

D i p l o m a r b e i t

Jörg Arnold

BAUHAUS-UNIVERSITÄT WEIMAR
Fakultät Bauingenieurwesen
Professur Bauphysik

DIPLOMARBEIT

cand. Ing.: Jörg Arnold

**Thema: Raumakustische Rekonstruktion der Schlosskapelle des
 Weimarer Residenzschlosses im Zustand von 1658 - 1774**

Erstprüfer: Prof. Dr. rer. nat. Oliver Kornadt

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Dipl.-Mus. Hagen Rosenheinrich

Betreuer: Dipl.-Ing. Dipl.-Mus. Hagen Rosenheinrich

Ausgehändigt am: 21. Dezember 2004

Einzureichen am: 21. März 2005

Reg.-Nr.: B/2004/135


Prof. Dr.-Ing. Rautenstrauch
Vorsitzender des Prüfungsausschusses

Erläuterungen zur Diplomarbeit

1. Aufgaben- und Zielstellung

Aufgrund von politischem Geschick und günstigen historischen Ereignissen gewannen der Standort Weimar und deren Mächtigen im Laufe der Geschichte stets an Bedeutung. Mitte des 16. Jahrhunderts wurde Weimar schließlich Regierungssitz. Die Entwicklung des Schlosses, ausgehend vom 10. Jahrhundert bis zu seiner heutigen Gestalt, ist Ausdruck dieses erfolgreichen Wirkens. In allen Bauphasen wies die Anlage eine Schlosskapelle auf. Mehrfach kam es jedoch zu verheerenden Bränden in der Schlossanlage, so dass es immer wieder nötig wurde, Teile der Anlage zu erneuern. Darüber hinaus wurde die Anlage des Weimarer Residenzschlosses im Laufe der Geschichte aus repräsentativen Gründen mehrfach umgebaut und erweitert. Diese Maßnahmen beeinflussten ebenso die Gestalt der Schlosskapelle, so dass es mehrere Bauphasen gab.

In dieser Diplomarbeit ist zu untersuchen, welche raumakustischen Qualitäten die Schlosskapelle des Weimarer Residenzschlosses im Zustand von 1658 – 1774 aufwies, bevor diese durch einen erneuten Brand ebenfalls zerstört wurde. Bedeutung erlangte diese Schlosskapelle durch das Wirken Bachs als Kapellmeister am Weimarer Hofe zwischen 1708 und 1717. Die Raumakustische Rekonstruktion ist ein bedeutender Beitrag zum kulturellen und soziologischen Verständnis der Musikauffassung jener Zeit und lässt Rückschlüsse auf die musikalischen Ausdrucksformen zu.

2. Schwerpunkte der Bearbeitung

- Eingehendes Studium der Quellenlage (Grundrisse, Schnitte, Oberflächenmaterialien, Ausstattung, Stiche, Gemälde, Schriftmaterial)
- Studium und Beschreibung relevanter Referenzobjekte zur Festlegung der damals vorhandenen Oberflächenmaterialien und Ausstattungen
- Aussagen zur Bestimmung der frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrade und der Diffusitäten für die damalige Raumkonfiguration
- Raumakustische Vergleichsmessung am vorhandenen Referenzobjekt des Bach-Hauses in Leipzig mit Win MLS 2000
- Auswertung der Messergebnisse bezgl. relevanter raumakustischer Kriterien
- Erstellung von Computermodellen im historischen Zustand der Schlosskapelle und des Referenzobjektes mittels des Akustik -Simulationsprogramms Catt-Acoustic
- Interpretation der Simulationsergebnisse hinsichtlich der raumakustischen Qualitäten der Schlosskapelle
- Aussagen zur historiologischen und musikwissenschaftlichen Bedeutung der Schlosskapelle in ihrem kulturellen, soziologischen und anthropologischen Zusammenhang und Verständnis
- Aussagen zur Bedeutung der Schlosskapelle auf die systemtheoretisch orientierte Verbindung zwischen ästhetischer Wahrnehmung des Raumeindrucks der Kapelle und der sozialen Kommunikation und deren Notwendigkeit unter der Ummantelung der musikalischen Ausdrucksfähigkeit

Raumakustische Rekonstruktion der Schlosskapelle des Weimarer Residenzschlosses im Zustand von 1658 - 1774

Diplomarbeit

Bauhaus-Universität Weimar
Fakultät Bauingenieurwesen
Professur Bauphysik

Jörg Arnold

Geboren: 15. Juli 1976, Jena
Matrikelnummer: 960005
Seminargruppe: B / 96 / C

Reg.-Nr.: B / 2004 / 135

Erstprüfer: Prof. Dr. rer. nat. Oliver Kornadt
Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Dipl.-Mus. Hagen Rosenheinrich

Weimar, März 2005

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Historischer Überblick	6
2.1	Geschichte des Weimarer Residenzschlosses	7
2.1.1	Von der Wasserburg zum Renaissanceschloss	7
2.1.2	Der barocke Neubau unter Giovanni Bonalino und Johann Moritz Richter	11
2.1.3	Nach dem Brand von 1774	15
2.2	Musikalische Aufführungspraxis im Barock	16
2.2.1	Musikpflege am Weimarer Hof	16
2.2.2	Johann Sebastian Bach in Weimar	18
2.3	Kunst und Wissenschaft im Barock	23
2.3.1	Kennzeichen barocker Architektur	23
2.3.2	Universelle Bildung im Barock	24
2.3.3	Akustischer Wissensstand im Barock	25
2.4	Historische Phasen im Kirchenbau	31
2.4.1	Entwicklung des christlichen Kirchenbaus	31
2.4.2	Entwicklung des protestantischen Kirchenbaus	33
3	Architektonische Rekonstruktion der Schlosskapelle	38
3.1	Geometrische Rekonstruktion	39
3.1.1	Quellenauswertung	39
3.1.2	Grundrisse	42
3.1.3	Schnitte	47
3.1.4	Visualisierung	49

3.2	Material und konstruktiver Aufbau	53
3.2.1	Wandflächen	53
3.2.2	Fußböden	54
3.2.3	Emporen und Gewölbe	55
3.2.4	Decke	56
3.2.5	Dachkuppel der Musikerempore	57
3.2.6	Fenster und Türen	58
3.2.7	Einrichtungsgegenstände	59
4	Raumakustische Simulation	63
4.1	Raumakustische Bewertungskriterien	64
4.1.1	Nachhall und Klangfarbe	66
4.1.2	Bewertung des Nachhalls	69
4.1.3	Energiekriterien	73
4.1.4	Deutlichkeit	74
4.1.5	Durchsichtigkeit	75
4.1.6	Raumeindruck	76
4.1.7	Lautstärke	78
4.2	Berechnungsverfahren	79
4.2.1	Schallabsorption	79
4.2.2	Schallreflexion	81
4.2.3	Beugung	84
4.2.4	Simulationsverfahren	86
4.2.5	Schlussfolgerung	87
4.3	Untersuchung des Referenzobjektes	89
4.3.1	Sommersaal im Bosehaus	90
4.3.2	Messdurchführung	91
4.3.3	Geometrie und Materialien	93
4.3.4	Rechenmodell	97
4.3.5	Eingabeparameter	99
4.3.6	Vergleich der Schallfeldparameter	102
4.3.7	Vergleich der Bewertungskriterien	105
5	Raumakustische Untersuchung der Schlosskapelle	111
5.1	Rechenmodell	112
5.1.1	Geometrie	112
5.1.2	Absorptionswerte	116
5.1.3	Streugrade	121
5.1.4	Transmissionsgrad	123
5.1.5	Raumklima	123
5.1.6	Messpositionen	124

5.2	Auswertung der Raumgestaltung	126
5.2.1	Absorptionsflächen	126
5.2.2	Volumenkennzahl	128
5.2.3	Direktschall und erste Reflexionen	130
5.3	Auswertung der akustischen Simulation	134
5.3.1	Nachhallzeit	135
5.3.2	Energiekriterien	142
6	Fazit	150
A	Literaturverzeichnis	A-1
B	Abbildungsverzeichnis	B-6
C	Tabellenverzeichnis	C-10
D	Symbole, Abkürzungen	D-12
E	Anhang	E-14
F	Erklärung	F-40

1 Einleitung

“Die Akustik musikalischer Aufführungsräume spielt [...] vor allem im Rahmen von Überlegungen zur Aufführungspraxis eine Rolle. Als Bindeglied zwischen Aufführendem und Rezipient beeinflusst der Raum die klangliche Gestaltung von Musik in erheblichem Maße. Gleichzeitig ist seine Akustik ein Spiegelbild der räumlichen Bedingungen des Musizierens im weiteren Sinne, mit all ihren sozialen und soziokulturellen Aspekten.“ [Wei 02]

Die Schlosskapelle als sakraler Raum innerhalb der Schlossanlage diente der Ausübung religiöser Handlungen und war fester Bestandteil des kulturellen Lebens am Weimarer Hof. Eine wesentliche Bedeutung erlangte sie in diesem Zusammenhang als musikalische Wirkungsstätte Johann Sebastian Bachs. Mit ihrer akustischen Qualität hatte sie einen erheblichen Einfluss auf sein musikalisches Schaffen. Die Untersuchung der raumakustischen Situation stellt damit eine notwendige Grundlage für eine musikwissenschaftliche Einordnung der Schlosskapelle als Aufführungsstätte geistlicher Kompositionen dar.

Der raumakustische Zustand der Weimarer Schlosskapelle ist eng mit der baulichen Entwicklung der gesamten Schlossanlage verbunden, die infolge äußerer Einflüsse einem steten Wandel unterlag. Die Umgestaltung der Schlosskapelle zu Beginn des 17. Jahrhunderts erfolgte nach barocken Raumvorstellungen. Einen wesentlichen Einfluss auf die Gestaltung des Innenraumes übte zudem die reformierte Kirche mit ihren liturgischen Anforderungen aus. Die historische Entwicklung der architektonischen Stilepoche sowie der protestantischen Kirche wird in Bezug zu dem akustischen Erscheinungsbild der Schlosskapelle näher untersucht.

Ausgehend von der architektonischen Rekonstruktion wird die Raumstruktur der historischen Schlosskapelle in ein Computermodell übertragen, mit dem die Berechnung akustischer

Bewertungskriterien möglich ist. Eine ausgiebige Recherche nach verwendeten Materialien und der Ausbildung baulicher Konstruktionen ist dabei die Grundvoraussetzung für aussagekräftige Simulationsergebnisse. Die Wahl der Materialparameter sowie der Einfluss der geometrischen Besonderheiten der Weimarer Schlosskapelle auf die simulierten Schallfeldparameter werden durch die Untersuchung eines Referenzobjektes verifiziert. Dafür werden die akustischen Bewertungskriterien mit einer raumakustischen Messung ermittelt und mit Simulationsergebnissen verglichen.

Ein besonderes Interesse bei der Simulation der Schlosskapelle gilt der Nachhallzeit als Charakteristikum der Halligkeit, die in sakralen Gebäuden die auffälligste akustische Raumeigenschaft darstellt. Mit der rekonstruierten Nachhallzeit wird die Schlosskapelle mit barocken Kirchen verglichen und bezüglich ihrer Lage im baustiltypischen Bereich beurteilt.

Der Direktschall und die ihm zeitig folgenden Reflexionen sind bei der raumakustischen Simulation maßgeblicher Gegenstand der Betrachtung. Während der Nachhall das Verschmelzen einzelner Töne zu einem Gesamtklang fördert, ist der Direktschall für die Deutlichkeit von Sprache und der klanglichen Durchsichtigkeit von musikalischen Strukturen verantwortlich. Der Einfluss des Direktschalls wird mit speziellen Energiekriterien beurteilt, mit denen gezielte Aussagen über die akustische Qualität einzelner Platzbereiche möglich sind. Die unterschiedlichen akustischen Anforderungen an die Schlosskapelle bei der jeweiligen Nutzung des Raumes werden mit den Energiekriterien differenziert untersucht und bewertet.

2 Historischer Überblick

Für die Untersuchung der raumakustischen Eigenschaften der “Himmelsburg“, wie die Schlosskapelle nach ihrem Umbau 1658 genannt wurde, sind verschiedene Vorbetrachtungen notwendig. Im Laufe der Zeit kam es durch äußere Einflüsse häufig zu Umbauarbeiten an der gesamten Schlossanlage, die zwangsläufig Veränderungen der Schlosskapelle nach sich zogen. Die historische Entwicklung des Residenzschlusses reflektiert dabei die damaligen architektonischen Auffassungen und muss daher in Verbindung mit dem technischen Stand der jeweiligen Epoche betrachtet werden. Zu Beginn der raumakustischen Untersuchung wird aus diesem Grund die Geschichte des Residenzschlusses und die Auswirkungen, welche die einzelnen Entwicklungsstufen auf die Raumakustik der Schlosskapelle bewirkten, näher beleuchtet.

Nicht nur die architektonischen Besonderheiten im Barock hatten Einfluss auf die raumakustischen Eigenschaften. Auch die Veränderung des Weltbildes infolge neuer Erfindungen ermöglichte eine stürmische Entwicklung der Geisteswissenschaften. Welche neuen Erkenntnisse im Bereich der Akustik erlangt wurden, und ob diese in konkreten Bauwerken eine Verwendung fanden, ist in diesem Kapitel ebenfalls Gegenstand der Betrachtung.

Auch die Konfession spielt eine beträchtliche Rolle bei der akustischen Untersuchung eines sakralen Raumes. Die Besonderheiten der reformierten, protestantischen Kirche haben die Architektur der Weimarer Schlosskapelle, und infolgedessen auch die raumakustische Situation, nachhaltig geprägt und werden daher in diesem Kapitel erörtert.

Die Schlosskapelle diente neben dem Gottesdienst auch als Aufführungsstätte für musikalische Vorträge. Um akustische Bewertungskriterien für sakrale Musikräume richtig interpretieren zu können, werden im Folgenden die Aufführungsgepflogenheiten und die Musikpflege am barocken Weimarer Hof untersucht. Eine besondere Gewichtung fällt dabei Johann Sebastian Bach zu. Dieser herausragende Künstler hat durch seine Arbeit das Musikverständnis der nachfolgenden Generation geprägt, wie kaum ein Zweiter.

2.1 Geschichte des Weimarer Residenzschlusses

Die Residenztradition Weimars reicht bis ins frühe Mittelalter zurück. Ein wichtiges Zeugnis dafür legt immer noch das an der Ilm gelegene Stadtschloss ab. Im Laufe der verschiedenen Epochen ist es mehrfach zerstört und beschädigt worden, im Mittelalter hauptsächlich durch Belagerungen befeindeter Nachbarn, in der Neuzeit vorwiegend durch Brände. Das Schloss unterlag dadurch baulichen Veränderungen. Unverändert blieb aber während der gesamten Zeit der Standort, ähnlich wie Kirchen oftmals immer wieder an demselben Ort errichtet werden.

Der Ort Weimar wurde nach neuesten Erkenntnissen erstmals im Jahre 899 auf einer Urkunde des Kaisers Arnulf unter der Bezeichnung “Vvigmara“ erwähnt. Dieser Name, der mit “Heiligwasser“ übersetzt werden kann, deutet auf ein vorchristliches Heiligtum hin, das als Herrschaftszentrum des im 6. Jahrhundert zerstörten Königreiches der Thüringer diente [Jac 99, S.43].

2.1.1 Von der Wasserburg zum Renaissanceschloss

Das Gebiet um die heutige Stadt Weimar ist seit der Ur- und Frühzeit kontinuierlich besiedelt. Als notwendige Lebensgrundlage spielte dabei der Wasserreichtum dieses Gebietes eine wesentliche Rolle, aber auch die umgebenden Erhebungen, die einen Schutz vor Witterungseinflüssen boten. Schon Anfang des 6. Jahrhunderts entwickelte sich im späteren Jakobsviertel eine Kernsiedlung [Jac 99, S.43]. In diesem Jahrhundert fällt das Weimarer Gebiet infolge der Zerschlagung des Thüringer Königreiches an die Franken. Einige Bodenfunde im Bereich der heutigen Schlossanlage stammen aus dieser Zeitepoche. Sie lassen vermuten, dass sich an der Stelle der heutigen Schlossanlage zunächst ein Adelshof befunden hat, der später befestigt und zu einer wasserumflossenen Burg ausgebaut wurde [Jac 99, S.44].

Über das Aussehen dieser Burg gibt es nur sehr spärliche Aussagen. Man muss sie sich als “einen mit Palisaden bestanden Erdwall mit davorliegendem Wassergraben vorstellen, innerhalb dessen Holzbauten als Wohnungen für die Grafenfamilie und eine kleine Schar getreuer unbeworbener Mannen dienten, während die Wirtschaftsgebäude außerhalb lagen“ [Jac 99, S.45]. In diesem Bauzustand wurde die Burg wahrscheinlich bei einer Belagerung im Winter 1173/74 zerstört [Bot 00, S.9].

Etwa 30 Jahre später war die Weimarer Burg wieder instand gesetzt. Die Gebäude wurden von einer steinernen Ringmauer umgeben, ein mächtiger Bergfried wurde errichtet, der zum Teil noch

heute im Schlossturm enthalten ist. Ein aus der Lotte gespeister Wassergraben umschloss das gesamte Areal. Am östlichen Teil der Ringmauer muss sich schon in dieser Zeit eine Burgkapelle befunden haben, deren Martinspatrozinium für ein Entstehen in fränkischer Zeit spricht [Jac 99, S.46]. Erwähnt wird diese Kapelle des Heiligen Martin aber erstmals im Jahre 1291 [Sch 04/1, S.5]. Das zu jener Zeit von der Ringmauer eingegrenzte Gebiet muss in etwa dem Gelände der heutigen Schlossanlage entsprochen haben [Bot 00, S.9].

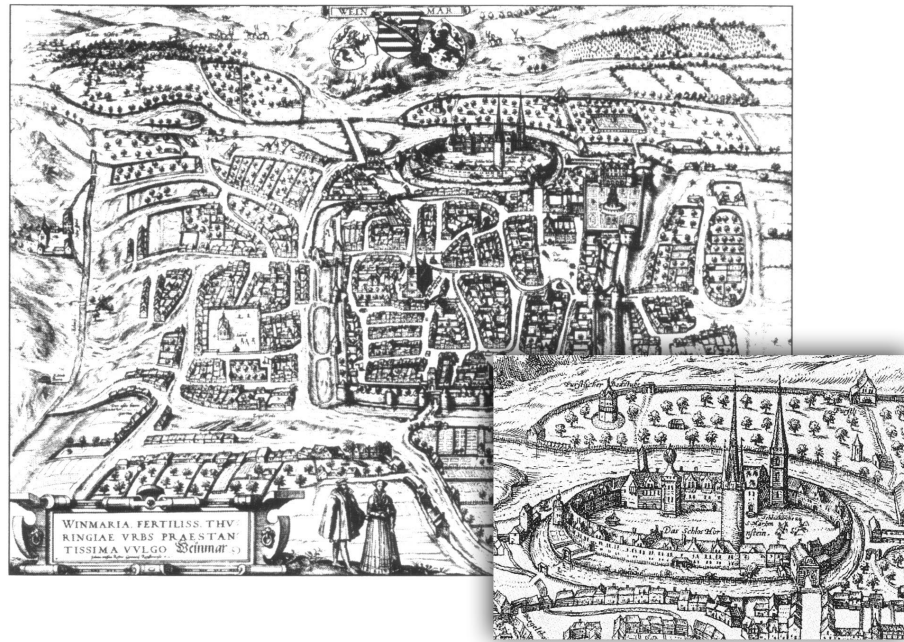


Abb. 2.1: Älteste Ansicht der Stadt Weimar mit “Schloss Hornstein“, Kupferstich nach Johannes Wolf, 1569/70, mit Detailausschnitt, [Bot 00, S.12], [Jac 99, S.46]

Am 9. Juli 1254 wird die Stadt Weimar erstmals in einer Urkunde erwähnt. Das Hauptziel für die Gründung der Stadt war eine zusätzliche Schutz- und Befestigungsfunktion der Weimarer Burg [Jac 99, S.48]. 1372 fiel das Gebiet an die aufstrebenden wettinischen Markgrafen von Meißen. Während ihrer Regierungszeit wurde die Stadt Weimar im Jahr 1424 von einem verheerenden Brand erfasst, dem auch die Burg zum Opfer fiel und vollständig verschwand [Sch 49]. Aus diesem Grund existiert im heutigen Schloss, bis auf die Fundamente des Schlossturmes, kein Bauteil aus der Zeit vor diesem Brand [Sch 49].

In den darauf folgenden Jahren war man fast ununterbrochen mit dem Wiederaufbau der Burg beschäftigt [Jac 99, S.51]. Anstelle von Fachwerkbauten wurde eine Anlage mit festen Bauwerken aus Stein errichtet. 1439 waren die Arbeiten an dem in gotischen Formen erneuerten Schlossturm, sowie an dem später mit “Bastille“ bezeichneten Torgebäude abgeschlossen.

Im 15. Jahrhundert gehörte es zur Fürsorgepflicht des Landesherrn die Möglichkeiten zur Ehrung Gottes zu schaffen und ein gottesfürchtiges Leben zu ermöglichen [Jac 99, S.52]. Vor allem Wilhelm (III.) der Tapfere, der 1445 den thüringischen Landesteil erbte, machte sich um die Hebung des kirchlichen Lebens in der Stadt Weimar verdient. So erbat er 1446 den thüringischen Herzog Papst Nikolaus V. um Ablass für die Burgkapelle St. Martin und 1464 erhielt er die Zustimmung des Papstes die Burgkapelle zur Kollegiatskirche zu erheben. Vier Jahre später waren die Umbauarbeiten abgeschlossen und die Kirche konnte geweiht werden [Bot 00, S.10]. Die anfänglich kleine Kapelle hatte sich zu einer gotischen Kirche entwickelt, zu der als Pedant zum runden Schlossturm ein polygonaler Glockenturm gehörte und deren Chorbau sich außerhalb der Ringmauer in Richtung Burggraben erstreckte [Jac 99, S.53] (Abb. 2.3).

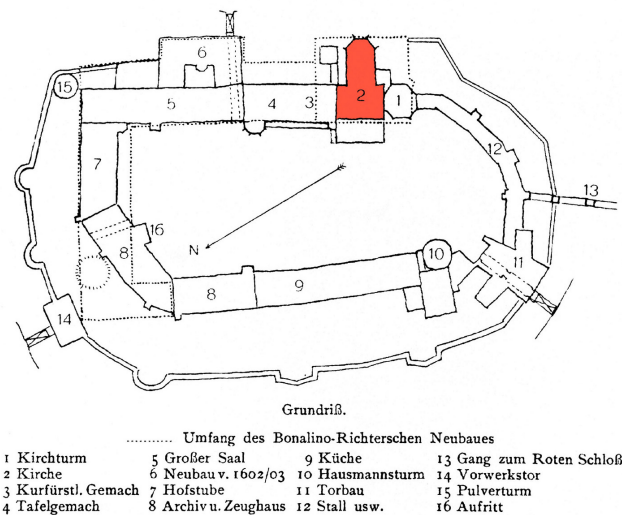


Abb. 2.2: Grundriss des Hornsteins (bis 1618) und der Wilhelmsburg (um 1650), [Bot 00, S.9], Kollegiatskirche rot hinterlegt

Infolge der Teilung des Kurfürstentums Sachsen, der sogenannten Leipziger Teilung von 1485, fiel Weimar an die ernestinische Linie der Wettiner, die überwiegend in Torgau und Wittenberg residierten. Weimar verlor als Residenzstadt an Bedeutung und damit ging auch das Interesse an Baumaßnahmen am Schloss zurück. Erst nachdem Herzog Johann von Sachsen sich 1513 in Weimar eine feste Hofhaltung einrichtete, wurden die Bauarbeiten wieder aufgenommen. In den kommenden Jahren erfolgten kleine und größere Umbauarbeiten, so dass allmählich eine spätgotische Anlage entstand. Neben der Kirche wurde am Ostflügel ein fester Palas mit Wohnräumen und Festsaal errichtet. Kabinette und Wohngemächer befanden sich im Nordflügel. Die äußere Gestalt des spätmittelalterlichen Bauwerks verlor mehr und mehr den Fortifikationscharakter einer Burgranlage und entwickelte sich schrittweise in ein Wohnschloß [Bot 00, S.10].

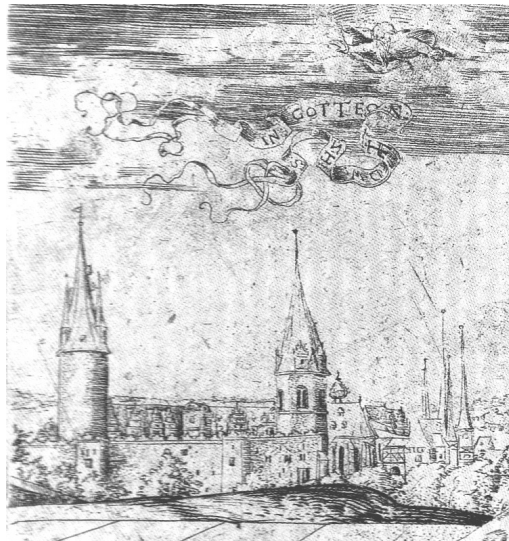


Abb. 2.3: Der Hornstein von Südosten, Kupferstich von Peter Ruddelstedt (Detail), 1552, [Bot 00, S.10]

Im Jahr 1531 wurde Weimar neben Torgau und Coburg zur Residenzstadt erhoben [Bot 00, S.10], so dass erneut Bautätigkeiten am Schloss begannen, das in dieser Zeit den Namen “Der Hornstein“ trug. Während der Um- und Neugestaltung des Schlosses verlor Kurfürst Johann Friedrich, Sohn von Herzog Johann von Sachsen, 1547 infolge einer Niederlage bei der Schlacht von Mühlberg seine Kurwürde und große Landesteile [Jac 99, S.56]. Weimar wurde dadurch zur alleinigen Residenzstadt der ernestinischen Fürsten, die erst mit dem Ende der Monarchie 1918 die Weimarer Residenz verlassen mussten [Jac 98, S.16]. Für die Stadt Weimar und das Schloss bedeutete dieser Verlust einen beachtlichen Aufschwung. Unter der Leitung der Baumeister Konrad Krebs und Nicol Gromann wurde das gotische Schloss im Verlauf mehrerer Jahre in eine Renaissanceanlage umgebaut [Bot 00, S.10].



Abb. 2.4: Porträt des Herzogs Johann Ernst von Sachsen-Weimar, Schlossbrand vom 2. August 1618, Gemälde von Christian Richter (Detail), um 1625, [Bot 00, S.11]

Einen groben Eindruck der Gesamtanlage des “Hornsteins“ vermittelt die Darstellung auf dem Stadtplan im Städtebuch von 1593, die auf einen Druck des Weimarer Rektors Johannes Wolf zurückgeht (Abb. 2.1). In Abb. 2.4 ist der Hornstein zum Zeitpunkt des Schlossbrandes vom 2. August 1618 erstaunlich detailliert dargestellt. Fast zeitgleich mit dem Beginn des Dreißigjährigen Krieges vernichtete dieses Feuer den zur Ilm hin gelegenen Osttrakt des Schlosses, den eigentlichen Wohnflügel, sowie die Kollegiatskirche, in der das Feuer auch vermutlich ausgebrochen war. Johann Ernst, Sohn des 1605 verstorbenen Herzog Johann Friedrich, begann unmittelbar nach dem Brand mit dem Wiederaufbau des Schlosses, der mit Ausnahme des erhalten gebliebenen Westflügels die gesamte Anlage grundlegend verändern sollte [Bot 00, S.14].

2.1.2 Der barocke Neubau unter Giovanni Bonalino und Johann Moritz Richter

Als Schlossbaumeister konnte der Herzog den berühmten Architekten italienischer Abstammung Giovanni Bonalino verpflichten. Dieser befand sich im Januar 1619 zu einer Besprechung in Weimar. An der Stelle des burgähnlichen “Hornsteins“ mit ovalen Grundriss sah er eine barocke Vierflügelanlage vor, die sich in den äußeren Abmaßen grob an dem Vorgängerbau orientierte. Bonalinos Konzept wich von der bis dahin in Deutschland üblichen Bauorganisation der Renaissance ab. Er fasste alle Räume der fürstlichen Hofhaltung, Landesverwaltung und private Gemächer in einem Organismus zusammen, in dem sich das einzelne Bauteil der Gestaltung des Gesamtbaus unterzuordnen hatte. Selbst die Kirche, die zwar an der alten Stelle errichtet werden sollte, wurde nicht traditionell in Vorhalle, Schiff und Chor gegliedert, sondern ordnete sich der geschlossenen Anlage unter (Abb. 2.5) und war als solche von außen nicht mehr erkenntlich [Bot 00, S.16]. Der Baukörper entwickelte sich nahezu symmetrisch von der N–S–Hauptachse. Eine Ausnahme bildete der zweigeschossige Westflügel. Da dieser das Feuer unbeschadet überstanden hatte, wurde er in die Gesamtanlage integriert [Bot 00, S.17].

Begonnen wurde die Entwurfsumsetzung mit dem Kirchenneubau in der Südostecke. 1623 war der Rohbau bereits vollendet, dessen äußere Mauern noch bis heute erhalten sind. Bonalino verließ aber noch im gleichen Jahr die Stadt, vermutlich nach Streitigkeiten mit den Behörden. Daraufhin übernahm Nicol Theiner die Leitung für den Schlossbau [Bot 00, S.17]. Doch der von Böhmen herannahende Krieg hatte Thüringen längst erfasst und Herzog Johann Ernst kam 1626 ums Leben [Jac 98, S.17]. Der neue Bauherr Herzog Wilhelm IV. konnte wegen der Kriegswirren die Bauarbeiten nicht fortsetzen. Lediglich die Schlosskirche wurde 1630 geweiht. Danach ruhten die Bauarbeiten bis zum Ende des Krieges.

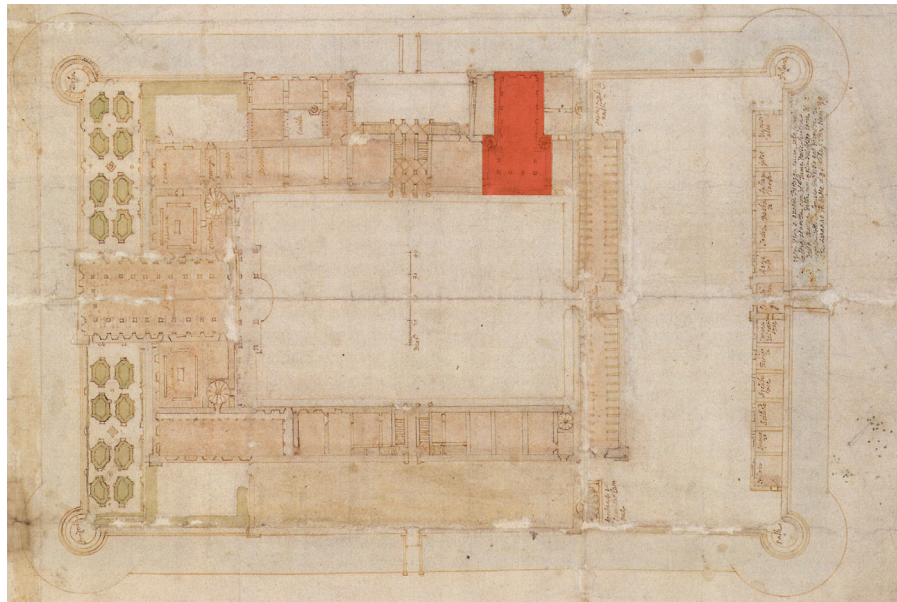


Abb. 2.5: Giovanni Bonalino, Grundriss der geplanten Vierflügelanlage des Schlosses, Feder, aquarelliert, um 1619 [Bot 00, S.14], Schlosskapelle rot hinterlegt

Ab dem Jahr 1636 orientierte sich Herzog Wilhelm IV. wieder stärker in Weimar. Arbeiten am Schlossgarten lassen sich erstmals für das Jahr 1642 belegen [Jac 99, S. 132] und 1650 wurde mit dem Neubau der Sternenbrücke begonnen [Bot 00, S.19]. Herzog Wilhelm IV., mit seiner Vorliebe für die Mathematik und das Bauwesen [Jac 99, S.116], hielt es für ratsam einen jungen Ingenieur heranzubilden. Seine Wahl fiel auf Johann Moritz Richter [Jac 99, S.130]. Die konkreten Baumaßnahmen am Schloss setzten unter der Leitung von Richter am 15. Januar 1651 ein. Dieser orientierte sich in vielen Einzelheiten an den Plänen Bonalinos. Jedoch verzichtete er auf den Südflügel und öffnete damit das Schloss in Anlehnung an französische und niederländische Bauten zu dem gerade angelegten Park hin. Doch speziell der Einfluss niederländischer Baukunst wird sich auf die Bauausführung ausgewirkt haben, da eine Studienreise Richters in die Niederlanden zu Baubeginn nur wenige Jahre zurücklag [Jac 99, S.134]. Auch das Gothaer Schloss Friedenstein dürfte ein Vorbild für das Weimarer Schloss gewesen sein, da an dessen Planungsarbeiten Wilhelm IV. zumindest punktuell beteiligt war.

Herzog Wilhelm hatte ein großes Interesse am Weiterbau der Schlossanlage, doch wegen Geldmangels kam es ständig zu Unterbrechungen. Unter der Leitung von Richter konnte nur der Ost- und Nordflügel der “Wilhelmsburg“ fertiggestellt werden, wie die Schlossanlage nun nach ihrem Bauherren bezeichnet wurde. Der Westflügel wurde dagegen nie vollendet. Auch das Konzept der Dreiflügelanlage konnte nicht konsequent umgesetzt werden. Im Süden befanden sich immer noch etliche Wirtschaftsgebäude entlang einer massiven Ringmauer, wie sie in der Abb. 2.6 zu sehen ist. Die “Wilhelmsburg“ blieb ein Torso [Jac 98, S.18].



Abb. 2.6: Das Weimarer Residenzschloss, Blick von Süden in die offene Schlossanlage, Aquarell eines unbekannten Künstlers, nach 1730, [Sch 04/1, S.9]

Doch auch wenn die „Wilhelmsburg“ in der angedachten Form nie fertig gestellt wurde, ist das Modell der Weimarer Schlossanlage bereits zu Lebzeiten von Wilhelm IV. zum Leitmotiv im thüringischen-mitteldeutschen Schlossbau avanciert. Auswirkungen hatte der Weimarer Schlossbau beispielsweise auf die dreiflügelige Moritzburg in Zeitz sowie auf das Schloss Augustusburg in Weissenfels, an deren Ausführungen Johann Moritz Richter aktiv beteiligt war [Jac 99, S.137]. Die Schlösser in Saalfeld und Eisenberg gehen ebenfalls auf die Grundidee des Weimarer Schlosses zurück [Sch 49].

Eine der letzten Baumaßnahmen von Johann Moritz Richter war die Umgestaltung der Schlosskirche. Im Mai 1658 wurde ein neuer, so genannter Pyramidenkanzelaltar aufgestellt. Unterhalb des Altares ließ sich Herzog Wilhelm VI. eine herzogliche Gruft bauen. Des weiteren wurde die Decke oberhalb des Altares geöffnet und eine Kuppel darüber errichtet (Abb. 2.6).

Nach dem Tod des Herzogs 1662 ruhten die Arbeiten am Schloss. Einen Eindruck der Gesamtanlage von Nordosten her vermittelt die Ansicht der Abb. 2.7. Die bedeutendste Maßnahme im Schlossbau des 18. Jahrhunderts ordnete Herzog Wilhelm Ernst an. Er ließ durch den jungen Architekten Gottfried Heinrich Krohne den hohen spätgotischen Helm des Schlossturmes abtragen und eine bewegte barocke Haube errichten. 1750 wurde die Laterne nochmals erneuert und verleiht dem Turm bis heute seine charakteristische Fernwirkung [Bot 00, S.33].

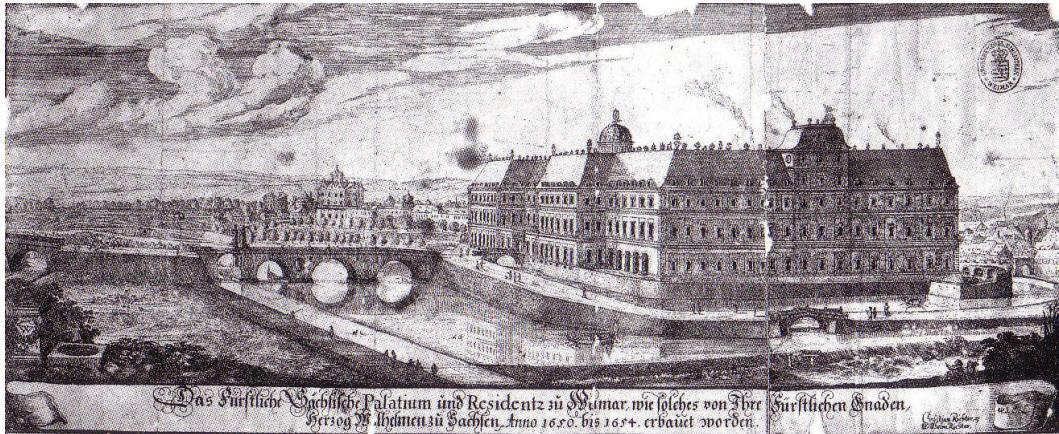


Abb. 2.7: Christian und Wilhelm Richter, Ansicht der Wilhelmsburg von Nordosten, Kupferstich, um 1655, [Bot 00, S.20]

Das Regierungsamt führte ab 1728 Weimars einziger Rokokofürst Herzog Ernst August [Bot 33]. Mit ihm setzte wieder ein gewisser kultureller Aufschwung in Weimar ein [Jac 98, S.19], doch vernachlässigte er die ihm mittelalterlich vorkommende “Wilhelmsburg”. Trotzdem ließ Herzog Ernst August Umbaupläne für das Residenzschloss ausarbeiten, die aber nie zur Ausführung gekommen sind [Bot 00, S.34].



Abb. 2.8: Johann Georg Schenk, Ansicht des Schlosses vor und nach dem Brand vom 6. Mai 1774, Radierung, um 1775, [Bot 00, S.35]

Am 6. Mai 1774 brach in der “Wilhelmsburg” ein Brand aus, durch den sämtliche Dachstühle und oberen Geschosse stark beschädigt wurden. Nach dem Brand sind von den beiden Architekten Eigenwillig und de Castrop Gutachten angefertigt worden, die sich beide für einen Wiederaufbau

des Schlosses aussprachen. Allerdings machte die finanzielle Lage des Landes einen Aufbau des Schlosses unmöglich [Jac 98, S.21]. Bilder von dem Zustande des Residenzschlosses vor und nach dem Brand zeigt die Abbildung Abb. 2.8.

2.1.3 Nach dem Brand von 1774

Im Jahr 1775 übernahm Carl August die Regierung für das Herzogtum Sachsen-Weimar-Eisenach, im selben Jahr, in dem auch Goethe erstmals Weimar betrat. Nach dem 15 Jahre lang – aus finanziellen Gründen – nur Sicherungsmaßnahmen am Residenzschloss vorgenommen worden, gründet man 1789 eine Schlossbaukommission, für deren Vorsitz unter anderen Goethe gewonnen werden konnte. Der Wiederaufbau des Schlosses ist eng mit Goethe verbunden, der vorwiegend für die künstlerischen Fragen verantwortlich war und hochrangige Architekten für die Planung gewinnen konnte [Hys 96].

Zwischen 1789 und 1803 wirkten die Architekten Johann August Arens, Nikolaus Friedrich Thouret sowie Heinrich Gentz an dem Neuaufbau des Schlosses im klassizistischen Stil zur „Carlsburg“. Arens versuchte in seinen Entwürfen die alte Bausubstanz des Richterschen Barockschlosses weitestgehend zu erhalten. So konnten die konstruktiv weniger beschädigten Außenmauern größtenteils mit in die jetzt vollständig nach Süden geöffnete Dreiflügelanlage einbezogen werden [Jac 98, S.22]. Der Innenausbau sowie die Funktionsbereiche wurden aber vollständig neu geplant [Sch 04/1]. Am 1. August 1803 waren die Arbeiten am Ost- und Nordflügel abgeschlossen und die Räume konnten von der herzoglichen Familie bezogen werden [Jac 98, S.23].

Danach verliefen die Bauarbeiten wegen Geldmangels schleppend. Erst 1830 begann der Ausbau des Westflügels unter der Leitung von Clemens Wenzeslaus Coudray. Die letzte große Baumaßnahme am Schloss ordnet Großherzog Wilhelm Ernst an, der zwischen 1913 und 1914 einen Südflügel errichten ließ und damit die Bauidee von Richter und Arens aufgab. Vier Jahre später unterschrieb er am 9. November 1918 die Abdankungsurkunde, die das Ende der Monarchie bedeutete. Kurz darauf konstituierte sich im Weimarer Residenzschloss die erste republikanische Reichsregierung. Das seit dem unbewohnte Schloss entwickelte sich allmählich zum Architekturdenkmal und beherbergt heute lediglich das seit 1923 bestehende Schlossmuseum.

2.2 Musikalische Aufführungspraxis im Barock

Nach dem Ende des Dreißigjährigen Krieges stellte Weimar ein charakteristisches Beispiel für den territorialstaatlichen Absolutismus dar. Das städtische Leben war stark von der Hofhaltung geprägt, da sich die regierenden Herzöge die Entscheidungsgewalt über alle wichtigen Angelegenheiten des bürgerlichen Lebens vorbehielten [Jun 85, S.6]. Besonders durch Herzog Wilhelm Ernst erfolgten Eingriffe in das Wirtschafts- und Sozialwesen der Stadt, aber auch in das persönliche Leben der Bürger. Das Herzogtum Sachsen-Weimar zählte in dieser Zeit etwa 50.000 Einwohner. Davon wohnten in der kleinen Residenzstadt Weimar etwa 4700 Menschen, von denen allein ein Drittel bei Hofe angestellt war [Jun 85, S.6].

Zu dieser Zeit wurden auch die musikalischen Gegebenheiten hauptsächlich durch Kirche und Hof bestimmt. In den Kirchen wurden die Organisten, Kantoren und Sänger für die Durchführung des Gottesdienstes und der Messe benötigt, bei Hofe waren die Musiker bei Festlichkeiten und Privatunterhaltungen unverzichtbar. Noch Anfang des 17. Jahrhunderts wurde Musik vom Adel und dem aufstrebenden Bürgertum oft aktiv im häuslichen Gebrauch, das heißt bei Gesang zur Laute oder beim geselligen Tanz, gestaltet. In der Zeit des Barock änderte sich aber der Charakter musikalischer Aufführungen durch die zunehmenden Möglichkeiten eines passiven Musikkonsums. Dies betrifft das Publikum in der Kirche ebenso wie bei Kammer- oder Theateraufführungen. Begünstigt wurde das verstärkt passive Konsumverhalten durch die bevorzugten musikalischen Stile, die eine vokale sowie instrumentale Virtuosität voraussetzten [Met 96, S.189]. Dies führte zu einer wachsenden Professionalisierung der Musiker und verstärkte ihren sozialen Status.

2.2.1 Musikpflege am Weimarer Hof

Die Entwicklungsmöglichkeiten musikalischen Schaffens waren im Weimar des 17. und 18. Jahrhunderts, wie auch in anderen künstlerischen Bereichen, stark von den Neigungen und repräsentativen Bedürfnissen der Landesfürsten anhängig. Dies ist auch der Grund für die mehrfache Auflösung der Weimarer Hofkapelle im 17. Jahrhundert und die darauf folgenden Neugründungen [Jun 85, S.7].

Im Jahr 1602 wurde durch Herzog Johann erstmals eine eigene Hofkapelle eingeführt. Im Gegensatz zu anderen Residenzstädten war das Einbeziehen von Stadtmusikanten in die hofische Musikpflege nicht die Regel, sondern eher die Ausnahme [Jun 85, S.7]. Für die Arbeit in der

Weimarer Hofkapelle konnten zum Teil sehr bekannte Musiker gewonnen werden. So leitete zum Beispiel ab 1615 Johann Hermann Schein für ein Jahr die Kapelle. Schon während seiner Weimarer Zeit leistete er einen wichtigen Beitrag zur Orchestermusik, bis er 1616 Thomaskantor in Leipzig und damit einer der bedeutenden Vorgänger Johann Sebastian Bachs in dieser Anstellung wurde. Zu jener Zeit wurden Musiker meist nicht zu dem alleinigen Zweck des Musizierens angestellt. Üblicherweise hatten sie eine zusätzliche Dienerfunktion auszuüben, die auch bis zu sozial angesehenen Positionen wie Pagenhofmeister oder Kammersekretär reichen konnte [Jun 85, S.7].

Auch während des Dreißigjährigen Krieges wurde die Pflege der höfischen Musik in Weimar fortgeführt, besonders unter Herzog Wilhelm IV. Die Hofkapelle bestand anfangs aus 13 Musikern, zu denen auch Christoph Bach, der Großvater Johann Sebastian Bachs, gehörte. Wilhelm IV. hatte ein reges Interesse an einer künstlerischen Entwicklung der Hofkapelle. Dies wird einerseits aus der engen Verbindung zu dem damals bekanntesten und bedeutendsten deutschen Musiker, dem Dresdner Hofkapellmeister Heinrich Schütz, deutlich. Dieser komponierte nicht nur für den Weimarer Hof einige Werke, sondern er beriet auch den Herzog bei dem Ausbau seiner Hofkapelle. Andererseits förderte Herzog Wilhelm IV. die musikalische Ausbildung seines Hofkapellmeisters Adam Drese, indem er ihn eine Studienreise zu einem bedeutenden italienischen Komponisten in Warschau sowie Aufenthalte bei Schütz in Dresden finanzierte. Die Musik spielte eine wichtige Rolle im höfischen Leben. Sie diente der Unterhaltung, aber auch der Repräsentation, insbesondere bei Geburtstagen oder Besuchen anderer Fürstlichkeiten. Mit dem erneuten Ausbau der Schlosskirche, die 1658 eingeweiht wurde, hatte Herzog Wilhelm IV. auch eine gute Vorraussetzung für die musikalische Pflege bei den Gottesdiensten geschaffen. In dieser Zeit zählte die Hofkapelle bereits 21 Musiker [Jun 85, S.8].

Durch Wilhelms Nachfolger Johann Ernst II. ist die Hofkapelle 1662 aufgelöst worden. Einzig die Hoftrompeter und -pauker sowie der Hoforganist blieben angestellt, die bei Bedarf durch Stadtmusikanten unterstützt wurden [Jun 85, S.11].

Im Jahr 1683 übernahmen seine beiden Söhne Wilhelm Ernst und Johann Ernst III. gemeinschaftlich die Regierung des Fürstentums. Besonders der jüngere Johann Ernst III. setzte sich für eine Wiedereinrichtung der Hofkapelle ein und stellte bereits 1683 die ersten Hofmusikanten an. Im Herbst zählten neben dem Kapellmeister und dem Hofkantor zwei Violinisten, zwei Sänger und acht Kapellknaben zur Hofkapelle, die bisweilen durch den Stadtkantor unterstützt wurden [Jun 85, S.11]. 1699 konnte der beste deutsche Geiger seiner Zeit, Johann Paul von Westhoff, für die Hofkapelle gewonnen werden. Mit seinem virtuosens Violinenspiel und seinen kompositorischen Fähigkeiten war er ein wichtiges Vorbild für den jungen Johann Sebastian Bach, der 1703 in der Weimarer Hofkapelle als Geiger angestellt war. Die gemeinschaftliche Hofkapelle umfasste zu der Zeit wieder 14 Kammermusiker. Gemeinsam mit den Hofmusikern, 7 Trompeter und 1 Pauker [Met 96, S.136], waren insgesamt 22 Musiker am Hofe angestellt. Zusätzlich

unterhielt sich Johann Ernst III. eine Privatkanzelle, was den Umfang verdeutlicht, in welchem die musikalische Pflege am Weimarer Hof zu Repräsentation, Unterhaltung und Erbauung betrieben wurde [Jun 85, S.19].

Vom Geist der Frühaufklärung war am Weimarer Hof hingegen wenig zu spüren. Vor allem von Herzog Wilhelm Ernst ging eine rechtgläubige Frömmigkeit aus, die einen Mittelweg zwischen den streitenden Richtungen der Kirche suchte. Als Konsequenz stand die Pflege der Kirchenmusik am Hofe im Vordergrund [Jun 85, S.36]. Die Hofkapelle war während Bachs Wirkungszeit in der Lage, den musikalischen Ansprüchen des Weimarer Hofes auf allen Gebieten gerecht zu werden. Neben der Kirchenmusik konnte mit dem vollständigen Vokalquartett, den zwei Kapellknaben und den Instrumentalisten auch eine "viestimmige" höfische Festmusik mit vokalinstrumentaler Besetzung aufgeführt werden. Zumal die Sänger auch im Instrumentalspiel ausgebildet waren und die Kapelle bei Bedarf durch Stadtmusikanten und Hoftrumpeter unterstützt werden konnte. Die Zusammensetzung der Hofkapelle hat sich während der Zeit Bachs in Weimar zwischen 1708 und 1717 nicht wesentlich verändert [Jun 85, S.38].

Ab 1696 sind in der Wilhelmsburg auch Opern in dem eigens dafür hergerichteten Fürstlichen Opern-Hause aufgeführt worden. Die Oper als Form des modernen weltlichen Musikgeschmacks beinhaltete immer auch eine Huldigung des Landesherren oder hoher Gäste [Jun 85, S.11]. Allerdings wurden diese Vorführungen schon nach vier Jahren wieder eingestellt. Weimar leistete damit nur einen kleinen, bescheidenen Beitrag zur Entwicklung des deutschen Musiktheaters.

2.2.2 Johann Sebastian Bach in Weimar

Bachs Weimarer Wirken repräsentierte schon das "dem Geist der Aufklärung entsprechende Streben zur enzyklopädischen, zur allumfassenden praktischen und theoretischen Sammlung, Wertung und Nutzung des musikkulturellen Lebens und Strebens seiner Zeit" [Jun 85, S.70]. Durch die Vollendung des Formenreichtums und der Ausdruckskraft der barocken Musik hat Johann Sebastian Bach wie kein anderer Musiker bis in unsere Gegenwart hineingewirkt. Seine Werke sind in einer besonderen Weise unzeitgemäß gewesen. Bach bediente sich traditioneller Formen, ohne jedoch restaurativ zu sein, griff dabei aber auf moderne Stilmittel und Kompositionstechniken zurück, ohne dabei selbst modern zu wirken [Met 96, S.146].

Das orthodoxe Luthertum Mitteldeutschlands mit seiner in Kirchen und Schulen verankerten Musikpflege bot Bachs angeborener Begabung für ernste, geistliche Musik einen sicheren Rückhalt. Die musikliebenden deutschen Fürstenhöfe, die in dieser christlichen Standesordnung ihren festen Platz hatten, sorgten für die nötige Ergänzung. Mit ihren französischen und italienischen nachgebildeten Hofkapellen, die sowohl die Musik in der Kammer wie in der Kirche zu bestreiten

hatten, vermittelten sie die Bekanntschaft mit den jeweils modernsten Stilrichtungen. Bach wusste diese Bedienungen mit großer Energie zu nutzen. Nach seiner soliden musikalischen Grundausbildung in der Jugendzeit hatte er keine wirklichen Lehrer mehr. Alles Folgende hatte er durch seine eigene Leistung erarbeitet. Besonders seine Kompositionen fertigte er nur durch “das Betrachten der damaligen berühmten und gründlichen Componisten“ [Met 96, S.147] an. Ausgangspunkte für seine ersten Kompositionen bildeten zunächst die Werke nord- und mitteldeutscher Organisten, die er während seiner Lehrzeit kennen lernte. Diese Einflüsse sind vor allem in seinen ersten Weimarer Orgelwerken zu erkennen [Met 96, S.147]. Da der Ausnahmekünstler Johann Sebastian Bach durch sein Wirken an der “Himmelsburg“ ein wesentliches Motiv für die akustische Untersuchung der ehemaligen Schlosskapelle der “Wilhelmsburg“ darstellt, sollen seine Lebensabschnitte bis zur Weimarer Zeit im Folgenden zusammengefasst werden.

Am 21.März 1685 wurde Johann Sebastian Bach als jüngster von sechs Söhnen in Eisenach geboren. Aus der weit verzweigten Bachschen Familie gingen immer wieder musische Geister hervor, die bis dahin schon fast zwei Jahrhunderte hindurch wesentliche Kantoren- und Organistenstellen inne hatten oder als Stadtpfeifer in Thüringen tätig waren. Noch am Ende des 18. Jahrhunderts wurden aus diesem Grund die Erfurter Stadtmusikanten kurz “die Bache“ genannt [Jun 85, S.15]. Schon als Knabe erhielt Johann Sebastian von seinem Vater Johann Ambrosius Unterricht auf der Violine und von seinem Onkel Johann Christoph, dem Eisenacher Hof- und Stadtorganisten, wurde er in das Klavier- und Orgelspiel eingewiesen.

Nachdem kurz nacheinander seine Eltern verstarben, wurde Johann Sebastian 1695 von seinem ältesten Bruder in Ohrdruf aufgenommen. Von ihm erhielt er weiteren Klavierunterricht und er sang in der Kurende des Ortes mit. Im März 1700 verließ er Ohrdruf gemeinsam mit seinem Schulfreund Georg Erdmann, um in Lüneburg die Michaelisschule zu besuchen, wo er auf Grund seiner Stimme eine Freistelle erhalten hatte. Hier wurde Bach in Mathematik, Logik und Rhetorik, Geschichte, deutscher Literatur sowie in humanistischen und theologischen Fächer unterrichtet. Da er bald nach dem Schulwechsel in den Stimmbruch kam, wird er sich in Gottesdiensten und bei festlichen Anlässen vorwiegend als Instrumentalist beteiligt haben [Met 96, S.135]. Während seiner Schulzeit unternahm er mehrere Reisen, um sich musikalisch fortzubilden. In dem nur einen Tagesmarsch entfernten Hamburg, einer damals wichtigen Musikmetropole für Kirchemusik, Oper, Orchester- und Kammermusik [Jun 85, S.16], konnte er den Hauptmeister der norddeutschen Orgelschule J.A. Reinecken erleben sowie sich auf dem Gebiet der Opern umsehen. Eindrücke der modernen Hofmusik nach französischem Vorbild sammelte er bei Vorträgen der berühmten Kapelle des Herzogs Wilhelm von Celle [Met 96, S.16]. Nach dem Abschluss der Lateinschule 1702 kehrte Johann Sebastian nach Thüringen zurück.

Seine erste Anstellung bekam der achtzehnjährige Johann Sebastian im März 1703 in der Privatkapelle Johann Ernst III. in Weimar. Seine Tätigkeiten bezogen sich hauptsächlich als Violinist auf die Kammermusik italienischer Komponisten, die am Weimarer Hof bevorzugt gepflegt

wurde. In dieser Zeit wurde er als Orgelsachverständiger vorgeschlagen und begutachtet die neue Orgel in Arnstadt. Von seinem Orgelspiel begeistert, erhielt er am 9. August eine Anstellung als Organist. Hier begründete er seinen Ruf als Organist und Orgelkenner [Met 96, S.136]. Um sich weiterzubilden, beantragte er 1705 einen Monat Urlaub. In Lübeck wollte er den bekannten Komponisten und Orgelspieler Dietrich Buxtehude aufsuchen. Jedoch kam er von dieser Reise erst nach vier Monaten zurück. Neben der Urlaubsübertretung warf man Bach vor, die Gemeinde mit seinem oftmals kühnen Orgelspiel zu verwirren. Neben den disziplinären Widerständen wuchsen auch die künstlerischen Diskrepanzen, so dass Bach die Stellung nach vierjähriger Tätigkeit aufgab.

Im Sommer 1707 nahm er eine Stellung als Organist an der Blasiuskirche in Mühlhausen an, wo er sich kurz darauf mit Maria Barbara Bach vermählte. In Mühlhausen versuchte Bach sich weiter künstlerisch zu entwickeln. Hier entstanden seine ersten erhaltenen Kirchenkantaten [Met 96, S.136]. Seine Kenntnisse im Orgelbau stellte er in seiner Disposition für den Umbau des vorhandenen Instruments unter Beweis [Jun 85, S.21]. Auf Grund von örtlichen Verhältnissen fühlte er sich bald in Mühlhausen künstlerisch eingeeengt. Mit Aussicht auf eine sozial angesehenere Stellung mit künstlerisch besseren Entfaltungsmöglichkeiten nahm Bach im Juni 1708 ein Angebot als Kammer- und Hoforganist in der herzoglichen Kapelle in Weimar an [Jun 85, S.26].

In Weimar bekam Bach endlich die musikalischen Aufgaben, die er suchte, fand im Kontakt mit den höfischen Angestellten und den jungen musikalisch begabten Prinzen neue künstlerische und geistige Anregungen. In den neun Jahren, in denen Bach in Weimar angestellt war, schuf er neben der Vokalmusik Kompositionen für verschiedenste Instrumente und Besetzungen. Seine kompositorische Meisterschaft und Individualität zeigt sich aber besonders bei seinen Orgel- und Klavierwerken [Jun 85, S.65]. In den ersten fünf Jahren als Hoforganist und Kammermusiker entstanden überwiegend Werke für Tasteninstrumente. Allerdings war damals eine prinzipielle Trennung von Musikstücken für Orgel oder Klavier nicht üblich. Sie waren für alle Tasteninstrumente gleichermaßen bestimmt. In der Kirche wurden sie auf der Orgel gespielt, beim häuslichen Musizieren auf den Saitenklavieren Klavichord oder Spinett sowie bei Aufführungen größerer Art auf dem Cembalo. Etwa ab 1715 begann Bach aber selbst seine Kompositionen zwischen Orgel- und Klavierstil zu unterscheiden [Jun 85, S.65].

In den ersten Weimarer Jahren wächst sein Ansehen als Orgelsachverständiger, seine kompositorischen Fähigkeiten konnten sich besser als vorher entfalten und er steigerte sein Können als Klavier- und Orgelspieler. Sein Ruf als Orgelvirtuose war in dieser Zeit bereits unbestritten [Met 96, S.136]. Bach begann seine ersten Schüler zu unterrichten und wurde als Sachverständiger für Orgelproben in immer entfernter gelegene Ortschaften beordert. Neben dem kirchlichen Dienst in der Kapelle engagierte er sich als Violinist und Cembalist bei der Kammermusik und zu Hoffesten. In den ersten in Weimar entstandenen Werken verarbeitete Bach vor allem die Anregungen seiner Lehrjahre. Es sind deutlich die Einflüsse der norddeutschen

Orgelmeister aus Lüneburg, Hamburg und Lübeck erkennbar. Seine Kantaten verkörperten den antiquierten Stil der von der Oper noch unbeeinflussten Kirchenkantate [Jun 85, S.67].

Nachdem Bach eine Stelle als Organist in Halle abgelehnt hatte, wurde er am 2. März 1714 zum Konzertmeister ernannt. Damit war die Pflicht verbunden, monatlich "neue Musikstücke" für die Gottesdienste in der Schlosskapelle bereitzustellen. Etwa in dieser Zeit setzt ein stilistischer Wandel in Bachs Kompositionen ein. Die Auseinandersetzung mit der am Hofe beliebten italienischen Konzertmusik prägte fortan sein Schaffen. Besonders die Konzertform von Antonio Vivaldi, der damals als einer der modernsten Komponisten galt, beeindruckte Bach [Jun 85, S.66]. Durch experimentieren mit Vivaldis Stilmerkmalen entstanden freie, konzertähnliche Formen der Orgelmusik. Bach schaffte es mit einer revolutionären Selbstverständlichkeit durch seine Orgelbearbeitungen italienischer Symphonien die weltliche Musik sozusagen in die Kirche zu transportieren.

Der Pflicht des regelmäßigen Kantatenschaffens ging Bach bis Ende 1716 gewissenhaft nach und komponierte in stetiger Folge etwa 30 Kantaten [Jun 85, S.68]. Die erste von "Amts wegen" komponierte Kantate "Himmelskönig, sei willkommen" wurde am 25. März 1714 in der "Himmelsburg" uraufgeführt. Das Kennzeichen seiner Kantaten ist die eher moderne, vierstimmige Besetzung der Streichinstrumente (Violine I/Violine II/Viola/Violoncello mit Kontrabass) im Gegensatz zur gebräuchlicheren fünfstimmigen Streicherbesetzung mit zwei Bratschen in der Mittellage. Die Instrumentation gestaltete Bach durch den Einsatz verschiedener Blasinstrumente (Blockflöte, Oboe, Fagott, Trompete) und den verschiedenartigsten Kombinationen dieser außerordentlich farbig [Jun 85, S.69].

Bachs musikalische Neuerungen sind auch in seinen Orgelchorälen zu spüren, die er in dem "Orgelbüchlein" zusammenfasste. Die Chormelodie erscheint in der Oberstimme in einem natürlich-sichtbaren Rhythmus. Bis dahin wurde die Melodie zugunsten einer feierlich-gedehnten Stimmung vorwiegend in der Basslage eingesetzt [Jun 85, S.66] und kam damit der katholischen Liturgie besonders gut entgegen. Die von Bach verwendeten, bewegteren Mittelstimmen dienen besser der Affektausdeutung des Choraltexes und werden durch eine mäßig bewegte Bassstimme gestützt [Jun 85, S.66], was für die Liturgie der protestantischen Kirche nur nützlich sein konnte. Der Choral an sich wird als echtes Lied behandelt und zeigt damit eine Tendenz zur "Vermenschlichung der Orgelmusik". Die Texte für Bachs Kantaten und Choräle stammten überwiegend von dem Weimarer Dichter und Hofbibliothekar Salomo Franck, dessen reiche Phantasie, Empfindungstiefe und mystische Elemente Bach bei der Vertonung seiner tiefgründigen Texte beflügelten [Jun 85, S.70]. In einigen Strophen wurden aber auch Bibelzitate und Psalmverse von Bach direkt übernommen

Dass Bachs Leistungen in Weimar die notwendige finanzielle Anerkennung fanden, zeigte sich auch in seiner Besoldung. Bei der Aufteilung der Akzidenzien (Nebeneinkünfte) war Bach ab

1715 mit dem Kapellmeister und dem Vize-Kapellmeister gleichgestellt. Neben der verhältnismäßig hohen Besoldung erhielt er auch verschiedene Sondervergünstigungen und Besoldungszulagen. Das dieser Status Bachs Nachfolgern als Hoforganist wieder entzogen wurde, zeigt deutlich, dass Herzog Wilhelm Ernst in Bach eine Ausnahmeerscheinung sah [Jun 85, S.28].



Abb. 2.9: Joh. Seb. Bach als Weimarer Konzertmeister, Johann Ernst Rensch d.Ä., Öl auf Leinwand, um 1715, [Jun 85]

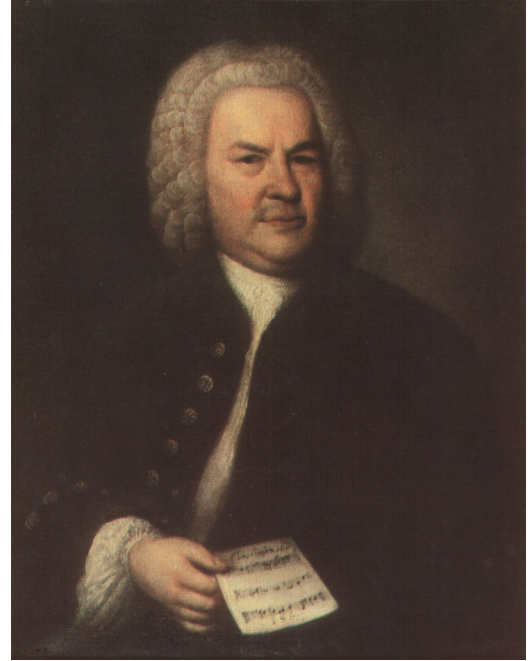


Abb. 2.10: Joh. Seb. Bach, Originalporträt, Elias Gottlob Haussmann, Öl auf Leinwand, 1746, [Jun 85]

Ab dem 1. August 1717 begann Bachs Besoldung in Köthen. Die neue Stellung bedeutete einen Aufstieg in eine höher angesehene soziale Kategorie unter den Hofmusikern sowie eine Verbesserung seiner Einnahmen. Am Weimarer Hof war die finanzielle Anerkennung seiner künstlerischen Verdienste so gut wie ausgereizt und der soziale Aufstieg wurde ihm verwehrt, nachdem die freigewordene Stelle des Hofkapellmeisters Drese an dessen Sohn vergeben wurde, obwohl dieser nicht Bachs musikalische Qualitäten besaß. Ein Grund, dass Bach bei der Neubesetzung der Stelle übergangen worden war, lag an den zunehmenden Diskrepanzen zwischen Herzog Wilhelm Ernst und seinem Neffen und Mitregenden Ernst August, zwischen deren Fronten Bach geriet. Nachdem er ohne das Wissen von Herzog Wilhelm Ernst die Stelle am Köthener Hof angenommen hatte, kam es zum offenen Bruch mit dem Herzog. Für Bach endete die Weimarer Zeit mit einer vierwöchigen Haft. Am 2. Dezember 1717 wurde Bach aus dem Arrest in Ungnade entlassen. Darauf hat er so schnell wie möglich die Stadt verlassen und ihr auch später keinen Besuch mehr abgestattet [Jun 85, S.62].

2.3 Kunst und Wissenschaft im Barock

Der Barock kennzeichnet den Stil des absolutistischen Zeitalters in etwa von 1570 bis 1780. Das barocke Zeitalter ist in Deutschland – als Folge des Dreißigjährigen Krieges – vor allem von einer desolaten Wirtschafts- und Sozialstruktur geprägt, sowie von dem zunehmenden Machtwillen der Landesfürsten und Territorialherren [Kir 84, S.A2]. Die infolge der Gegenreformation neu gewonnene Macht der Kirche solidarisierte sich im 17. Jahrhundert wieder mit der weltlichen, in dem sie ihrer beider Machtentfaltung durch das Gottesgnadentum legitimierte [kun 05]. Beide Mächte stellten eine absolute Herrschaftsform dar, die ihre Macht auch nach außen hin sichtbar zeigen wollten. Dies spiegelt sich überwiegend in der kirchlichen und feudalen Architektur wider, deren Bauwerke die Autorität der Kirche und der Staaten propagierten und damit vorwiegend eine Repräsentationsfunktion zu erfüllen hatten [kun 05]. Die barocke Baukunst konzentrierte sich aus diesem Grund im Wesentlichen auf den Sakral- und auf den Schlossbau [Gra 82, S.47].

2.3.1 Kennzeichen barocker Architektur

Auf die Baukunst wurde der Begriff des Barock (port.: barocco = schiefrunde Perle) erst nach der Mitte des 18. Jahrhunderts in Frankreich angewendet und bedeutet so viel wie “übertrieben“ und “schwülstig“ [Gra 82, S.47]. Es zeugt davon, dass diese künstlerische Periode zur Zeit der Begriffsklärung kein großes Ansehen genoss und der Gegensatz zum vorherrschenden Klassizismus verdeutlicht werden sollte [Gru 86, S.14]. In Deutschland wurde der Begriff “Barock“ als Stilbezeichnung erst etwa 100 Jahre später geprägt. Hier bezog er sich nicht mehr ausschließlich auf die Baukunst, sondern auf alle kulturellen Äußerungen dieser Epoche [Gra 82, S.46].

Die barocke Strömung entstand in Italien. Die Anfänge werden in Michelangelos “Kolossalordnung“ am Kapitolspalast (1564) und Vignolas Raumprinzip der Jesuitenkirche Il Gesu (1568-75) in Rom gesehen [kun 05]. In Deutschland setzte sich der Barock infolge des Dreißigjährigen Krieges erst später durch. Bereits während des 17. Jahrhunderts ließ sich in Italien eine klassizistische Gegenbewegung erkennen, während in Frankreich und vor allem in Süddeutschland ab etwa 1720 der Barock zunächst in das leichter und spielerisch wirkende Rokoko überging. Im gesamten außeritalienischen Europa stand der Frühbarock zunächst unter dem Einfluss italienischer Architekten. Doch besonders in Österreich, Deutschland und Frankreich kam es zur Durchmischung mit regionalen Vorstellungen und damit zu einer eigenständigen Entwicklung [Gra 82, S.46].

Die barocken Bauformen gingen aus der italienischen Renaissance hervor, übertrafen diese jedoch in Aufwand und Vielgestaltigkeit [Gru 86, S.14]. Vorerst entstanden keine wirklich neuen Bauformen. Der Frühbarock drückte sich in einer größeren Freiheit in der Verwendung und Zusammensetzung der Elemente aus. Markante Merkmale sind die stark gegliederten Fassaden mit Säulen oder Pilastern, weit ausladende Gesimse sowie die üppigen plastischen Details. Im Unterschied zur Renaissance ordnete sich im Barock jedes Detail dem Gesamtobjekt unter, so dass einheitliche Gebäudeensembles entstanden, denen eins Gemeinsam ist: eine unbedingte Symmetrie [Gru 86, S.14], dem Gleichnis göttlicher Ordnung.

Regelmäßigkeit und Symmetrie sind grundlegende Ausgangspunkte in Bonalinos Entwurf der „Wilhelmsburg“. Er fasste dabei einzelne Bauelemente so zusammen, dass sie eine äußere Einheit bildeten. Sein Entwurf stellt damit die erste Übertragung italienischer Barockgedanken auf mitteldeutschen Boden dar [Sch 49]. Jedoch lassen sich die Einflüsse „von italienischen Palästen der Spätrenaissance nicht verleugnen“ [Bot 00, S.19], die sich beispielsweise in Bonalinos Fassadengliederung zeigen.

Der Barock war stark von dem Willen geprägt ein Gesamtkunstwerk zu schaffen. Die Führungsrolle übernahm die Architektur, der alle anderen Kunstgattungen untergeordnet waren [kun 05]. Beziehungsweise wurden diese oft gezielt eingesetzt und sind bisweilen auch nicht voneinander zu unterscheiden. Diese besondere Gestaltungsweise bediente sich des Mittels der Illusion [Gra 82, S.47]. So wurden flache Decken durch entsprechende Malerei zu Gewölben, wirkliche Kuppeln durch eine aufgemalte Zweitkuppel zu turmartigen Gebilden oder Stuckfiguren verschmolzen unmerklich mit Deckenfresken, deren raffinierte Perspektive dem Gebäude die Illusion räumlicher Unendlichkeit verleiht [kun 05]. Gerade die Betonung religiöser Sinngehalte im weltlichen Schlossbau zeigt an, dass ein neues Lebensgefühl in die von der Kirche vorgegebene Richtung einlenkt. „Der Barock ist die letzte große abendländische, wirklich schöpferische Epoche. ... Alles Spätere ist Rückgriff auf Früheres.“ [Clo 91, S.75].

2.3.2 Universelle Bildung im Barock

Diese Epoche erbrachte auch einen unglaublichen Aufschwung an wissenschaftlichen Erkenntnissen und technischen Leistungen. Neue Entdeckungen und Erfindungen, wie der Magnetismus, das Fernglas und das Mikroskop, bedeuteten einen Aufbruch in bisher verschlossene Welten und gaben den Weg frei in neue Theorien. In dieser Umbruchsstimmung kam es zu einer teilweise revolutionären Ablösung vom Weltbild des Mittelalters, zu dessen spektakulärsten Indizien der Prozess der Kirche gegen Galileo Galilei (1633) zu rechnen ist [Kir 84, S.A2]. Analog zur Architektur galt Rom als „Mittelpunkt der geistigen Welt, wo einem Wissenschaftler jede für seine Forschungen notwendige [...] Unterstützung gewährt werden konnte.“ [Kir 84, S.A2].

Der Mensch im Barock hatte ein überschaubares Bildungsideal mit geringer Spezialisierung. So gilt das 17. Jahrhundert auch als das Jahrhundert der Polyhistorie. “Ein Verlangen nach universeller Erkenntnis förderte in dieser Epoche das Streben nach einer Universalität des Wissens“ [Röm 81, S.9] auf der Grundlage des noch mittelalterlichen Wissenschaftssystems der Artes liberales. Für einen Naturwissenschaftler war damit eine Ausbildung in den 7 freien Wissenschaften – Grammatik, Rhetorik, Dialektik, Arithmetik, Geometrie, Musik und Astronomie – unerlässlich. Hinzu kamen Kenntnisse der antiken Mythologie und der Bibel, da die Bibel als Quelle der Wahrheit diente [Röm 81, S.14]. Eine große Breite des Wissens war in der Barockzeit eine Grundvoraussetzung wissenschaftlicher Arbeit, da man “die Gesamtwissenschaft als ein wohlgeordnetes System miteinander verbundener Einzelgebiete“ [Röm 81, S.10] auffasste, in der die Einzelwissenschaft immer im Zusammenhang der übrigen Wissenschaften betrachtet wurde.

Die Basis aller Wissenschaften stellte die Mathematik dar, da in der “Zahl“ die Voraussetzung zur Erkenntnis der Wahrheit schlechthin gesehen wurde. In dem Kernsatz der barocken Philosophie: “Was numerisch erfassbar ist, ist wahr!“ [Röm 81, S.10] spiegelt sich diese Haltung eindeutig wider. Einzelercheinungen verloren dabei ihren individuellen Wert und wurden als Teile eines Ganzen betrachtet: “Nicht die Einzelheit selbst, sondern die Summe aller Einzelheiten erscheint [...] von Belang.“ [Röm 81, S.10]. Die Einheit wurde theologisch durch den dreieinigen Gott symbolisiert. Jeder Wert konnte mit Hilfe der Zahlen in seiner Stellung zu Gott beurteilt werden, wobei die Zahl Zehn als Symbolwert der göttlichen Vollkommenheit galt [Kir 84, S.A3]. Auch der Mensch selbst, im Renaissancezeitalter noch Mittelpunkt allen Seins, wurde im Barock als kleiner Teil einer vollkommenen, göttlichen Einheit gesehen [Röm 81, S.11]. Der barockdenkende Mensch war sehr religiös und gottverbunden. Für ihn “formt die natürliche Harmonie von Leib, Geist und Seele den Menschen als einen Mikrokosmos. In einer harmonischen Struktur ist der Mensch ein Bestandteil der großen Harmonie Gottes, des Makrokosmos.“ [Kir 84, S.A4].

2.3.3 Akustischer Wissensstand im Barock

Als wissenschaftliche Disziplin gewann die Akustik erst im vergangenen Jahrhundert an Bedeutung. Denkt man aber an die Experimente des Pythagoras von Samos und seiner Schule mit dem Monochord (eine gespannte Seite) um 550 v.Chr., stellt man fest, dass die Akustik zu den ältesten Experimentalwissenschaften gehört [Ull 02, S.65]. Die Denker der Antike beschäftigten sich neben der Schallentstehung auch mit seiner Ausbreitung und Fortpflanzung. Aristoteles schrieb, dass ein Echo entsteht “wenn die Luft von einer Wand am Vordringen gehindert und gleich einem Ball zurückgeworfen wird.“ [Röm 94, S.11], womit er schon die wesentliche Bedeutung der Luft für den Schall erkannt hatte. Chrysippus beschrieb bereits um 200 v. Chr. eine Analogie zwischen Schall- und Wasserwellen. Damit verbunden war die oszillierende Störung des Ausbreitungsmediums und das bei der Ausbreitung keine Materie transportiert wird [heu 97].

Die älteste bekannt gewordene Überlieferung, die einen konkreten Bezug zwischen Akustik und Baukunst herstellt, verfasste der römische Architekturschriftsteller Vitruvius Pollio um 25 v. Chr. in dem 10-bändigen Werk „de architectura“. Er diskutierte über die akustischen Verhältnisse in griechischen Theatern und gab mit seinen Erfahrungen im Bereich der Akustik Hinweise für den Bau neuer römischer Theater [Röm 94, S.11]. Er kam zu der Erkenntnis, dass die Baumeister mit der Wahl eines gerundeten Zuschauerraumes, gewollt oder intuitiv, auf die Naturgesetze der Schallausbreitung eingegangen waren. Ferner berichtet er von im Zuschauerraum eingebauten Tonvasen, die auf verschiedene Tonhöhen abgestimmt waren [Rei 79, S.9]. Diese Vasen entsprachen heutigen „Helmholtz-Resonatoren“, die dem Schallfeld Energie entziehen und somit nachhallregulierend wirken. Später wurden auch in mittelalterlichen Kirchen ähnliche Vasen gefunden, die auf tiefe Lagen der menschlichen Stimme eingestellt wurden. Allerdings dürfte die exakte Wirkungsweise den damaligen Baumeistern noch nicht bekannt gewesen sein [Rei 79, S.10]. Es kann also davon ausgegangen werden, dass Erfahrungswerte und Intuition eine wesentliche Grundlage für die antiken Baumeister bildeten.

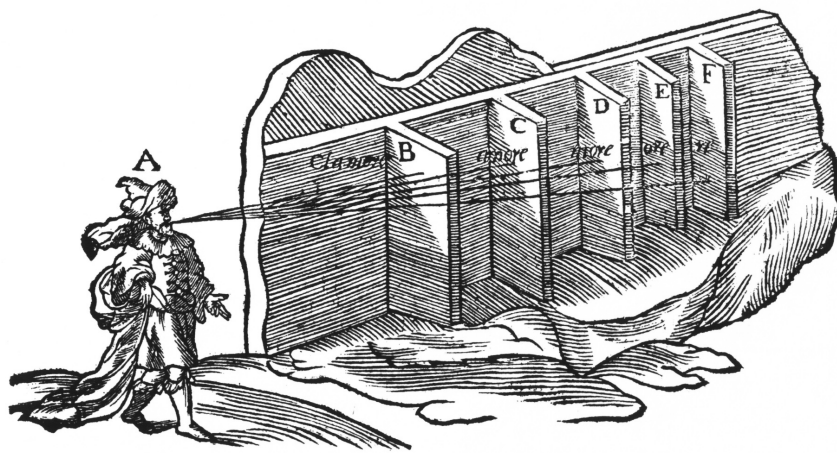


Abb. 2.11: Versuchsanordnung zur mehrfachen Echobildung nach Athanasius Kircher, [Kir 84, S.35]

In den folgenden Jahrhunderten wurden aus raumakustischer Sicht keine wesentlichen neuen Erkenntnisse gewonnen [Rei 79, S.13]. Erst mit der allmählichen Veränderung des Weltbildes und dem gestiegenen technischen Entwicklungsstand auf Grund neuer wissenschaftlicher Entdeckungen wurden zu Beginn des 17. Jahrhunderts vorwiegend experimentelle Untersuchungen auf dem Gebiet der Schallentstehung und –ausbreitung durchgeführt. Gianfrancesco Sagredo versuchte 1615 mit Hilfe eines Vakuums die Notwendigkeit der Luft für den Schall nachzuweisen. Marin Mersenne trug mit seinem 1636 erschienen Werk „Harmonie universelle“ wesentlich zur Quantifizierung der Tonhöhe als Frequenz einer schwingenden Seite bei und führte verschiedene Experimente zur Ermittlung der Schallgeschwindigkeit durch. Eine Messmethode basierte auf der Zeitdifferenz des von einer in bestimmter Entfernung stehenden Wand zurückgeworfenen Echos.

Zur selben Zeit entwickelte der in Rom lebende, deutsche Jesuitengelehrte Athanasius Kircher – der ähnliche Versuche wie Mersenne durchführte (Abb. 2.11) – eine besondere Vorliebe für Schallreflexionen. Er gilt als einer der vielseitigsten und bedeutendsten deutschen Gelehrten seiner Epoche [Röm 81, S.48]. Mit seiner modernen Überzeugung, dass es dem Menschen erlaubt sei den Geheimnissen der göttlichen Schöpfung auf den Grund zu gehen, wurde für ihn das Experiment zur Grundlage jeder wissenschaftlichen Forschung [Ign 02, S.161]. Kircher war ein Polyhistor mit unbegrenzten Wissens- und Forschungsdrang, ein Prototyp des barocken Gelehrten, ausgebildet in allen relevanten Künsten, weswegen sich sein Wirken und seine Werke auch über eine Fülle von Themen erstreckt.

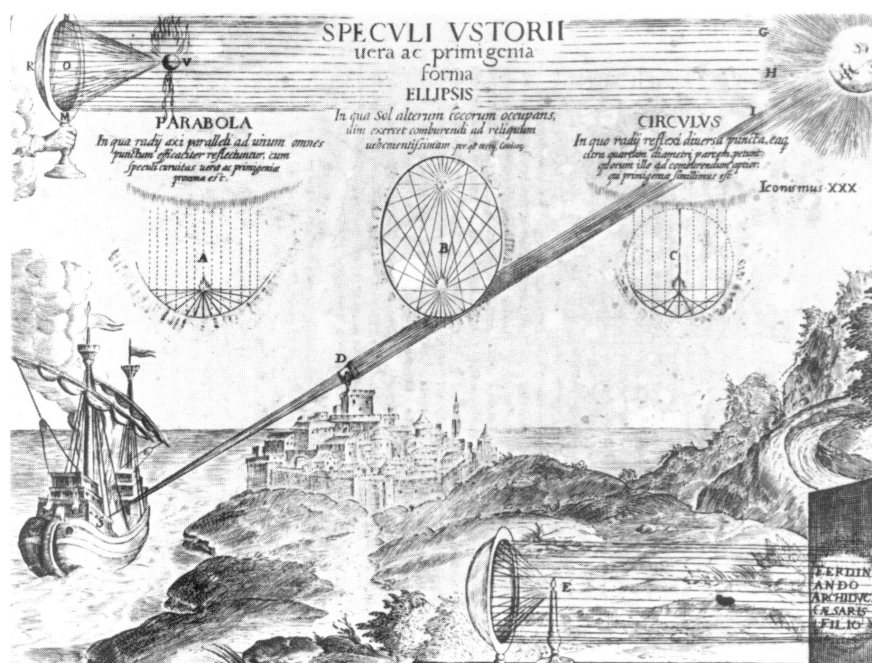


Abb. 2.12: Geometrische Strahlenverfolgung bei der Anwendung von optischen Geräten nach Athanasius Kircher, [Röm 81, S.83]

Sein Hauptwerk über die Akustik erschien 1673 unter dem Titel „Phonurgia Nova“, größtenteils eine Abschrift des neunten Buches der 1650 erschienen „Musurgia Universalis sive Ars Magna Consoni et Dissoni“. Beide Werke fanden in Deutschland eine schnelle Verbreitung. Mit der Übertragung der lateinischen Fachtermini der Akustik erreichte besonders die Übersetzung der „Phonurgia Nova“ („Neue Hall- und Thon-kunst“) auch ein breites Publikum wissenschaftlich interessierter Laien [Kir 84, S.A3]. Kircher versucht in diesen Werken ausführlich die längst bekannten Gesetze der Schallreflexion wissenschaftlich und experimentell nachzuweisen. Um die Schallvorgänge beschreiben zu können, fasste er die Wellen in Schallstrahlen zusammen, da sich seiner Meinung nach der Schall nach allen Seiten hin gleichmäßig und geradlinig ausbreitet.

Diese Vorgehensweise Kirchers mit der “Verfolgung des Strahlenganges“ ist nach Lothar Cremer, ein bedeutender Raumakustiker des 20. Jahrhunderts, “die älteste raumakustische Untersuchungsmethode“ [Ull 02, S.71], die noch heute bei akustischen Berechnungen angewendet wird. Die in dieser Arbeit verwendete Software zur Beurteilung der Raumakustik in der “Himmelsburg“ basiert ebenfalls auf der Verfolgung der Energieanteile einer Schallemission in Form von Strahlen.

Im Kern sind Kirchers Aussagen über die Reflexionen des Schalls noch heute als richtig anzusehen [Kir 84, S.A3]. Dabei ging er von einer Parallelität zwischen Akustik und Optik aus. Licht und Schall werden an jedem Gegenstand reflektiert, Reflexionen verbessern sich, je glatter der Gegenstand ist [Ull 02, S.71], Einfallswinkel und Reflexionswinkel sind gleich groß [Kir 84, S.A3]. Die Analogie Kirchers Herangehensweise bei der geometrischen Strahlenverfolgung bei akustischen und optischen Problemen wird in Abb. 2.12 und Abb. 2.13 verdeutlicht.

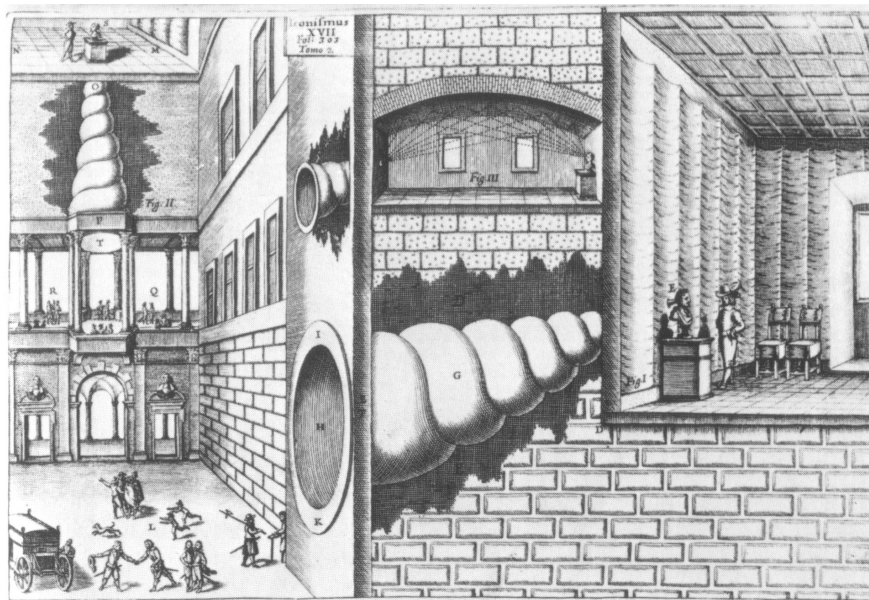


Abb. 2.13: Modell einer Abhöranlage und Darstellung der fokussierenden Wirkung gewölbter Decken nach Athanasius Kircher, [Röm 81, S.87]

Eine wesentliche Neuerung Kirchers Arbeit war, dass er nicht bei mathematisch-physikalischen Beweisen seiner Behauptungen verharrte, sondern dass und wie er versuchte praktische Nutzenanwendungen abzuleiten [Kir 84, S.A3]. Allerdings unterlag Kircher dabei auch einer großen Anzahl an Irrtümern und Fehlern, die aus der geistigen Haltung des barocken Zeitalters entstanden [Kir 84, S.A2]. Kircher ging davon aus, dass sich der Schall proportional mit jeder Reflexion verstärken würde. Aus dieser Erkenntnis heraus beschrieb er die Wirkungsweise von Flüstergalerien und entwickelte schneckenförmig gewundene Röhren zur Lauschüberwachung (Abb. 2.13). Er stellte fest, dass bei deren Konstruktion und Dimensionierung keine so große

Genauigkeit erforderlich war wie bei optischen Geräten, was heute mit der viel größeren Wellenlänge des Schalls in Bezug zu elektromagnetischen Wellen erklärbar ist [Ull 02, S.74].

Seine Erkenntnisse aus der Strahlenverfolgung versuchte Kircher auch auf die Beurteilung raumakustischer Eigenschaften anzuwenden [Kir 84, S.A3]. Aus der fokussierenden Wirkung von gewölbten Decken (Abb. 2.13) zog er konkrete Schlussfolgerungen auf die Aufführungspraxis von Kirchenmusik, wofür er selbst in der Kuppel von St. Peter in Rom Experimente durchführte [Kir 84, S.A3]. Er kam zu dem Ergebnis, dass besonders ein kuppelförmiger Bau der Kirchenmusik dienlich ist. Eine besondere Wirkung konnte seiner Meinung nach erzielt werden, wenn die Reflexionen als konstruktives Element mit in die Komposition einbezogen werden. Dies erläuterte Kircher detailliert anhand einer typisch zeitgenössischen Aufführungspraxis. Durch eine kleine Anzahl an Musikern, die in einer Kuppel spielen, kann, infolge der schallverstärkenden Wirkung der Kuppel, im Kirchenschiff die klangliche Illusion eines großen Orchesters erzeugt werden [Kir 84, S.A4].

Da er von einer zeitgenössischen Praxis spricht, kann davon ausgegangen werden, dass diese Art der musikalischen Aufführung auch in Weimar bekannt gewesen ist. Damit wäre eine mögliche Erklärung gegeben, warum in der "Himmelsburg" nachträglich die Musikerempore über dem Kirchenschiff errichtet wurde. In diesem Fall würde es sich bei der kuppelförmigen Dachhaut um ein akustisch geplantes Stilmittel handeln. Da sich die Musiker nicht irgendwo im Raum befanden, sondern über dem Kirchenschiff, und die Musik folglich von oben in den Raum strömte, konnte eine zusätzliche Illusion geschaffen werden. Für einen typischen – religiösen und musikliebenden – Menschen des barocken Zeitalters muss dann, besonders bei der klar strukturierten Musik Bachs, der Eindruck entstanden sein, dass die von "oben" herab den Raum erfüllende Musik etwas Göttliches sein muss. Für die Möglichkeit einer aus akustischen Forderungen heraus entstandenen Baukonstruktion spricht auch das Vorhandensein ähnlicher Bauwerke in der näheren Umgebung [wer 04]. So spielten in der gleichen Zeit auch in dem Schallhaus auf dem Schloss Heidecksburg in Rudolstadt die Musiker auf einer über dem Raum befindlichen Empore, die kuppelförmig überdacht war. Die Musik drang durch eine Deckenöffnung in den darunter liegenden, barocken Ballsaal, der eine ansprechende Akustik besessen haben muss, da berühmte Solisten sowie angehörige der Familie Johann Sebastian Bachs bei Konzerten mitwirkten [sch 04/2]. Der Sommersaal des Bosehauses in Leipzig, der Sitz des heutigen Bachmuseums, war zur Zeit Bachs ebenfalls ähnlich konstruiert. Allerdings wurde hier die sogenannte Schall- oder Echokammer [bac 04] nicht mit einer Kuppel überdacht.

Athanasius Kircher riet auch bei dem Bau von Theatern für die Wände im Bühnenbereich eine halbkreisförmige Konstruktion zu wählen [Kir 84, S.A4]. Ob eine solche Bauweise in Theatern eine Anwendung fand, ist nicht bekannt. Allerdings haben barocke Rangtheater bekanntermaßen einen ausgezeichneten Ruf hinsichtlich ihrer akustischen Raumwirkung [Rei 79, S.12], die sich überwiegend auf der architektonischen Gestaltung begründet. Die Brüstungen der Ränge,

verschiedene Wandelemente und Decken wurden stark gegliedert und reich verziert ausgeführt. Sie sorgten für reichlich diffuse Schallrückwürfe und damit für eine herrliche akustische Rückwirkung [Rei 79, S.12]. Der Akustiker Walther Reichard ist der Meinung, dass sich die Baumeister dessen aber nicht bewusst gewesen sind. Er behauptet, die günstige Akustik der Barocktheater war ein Zufallsergebnis, so wie die meisten organischen Entwicklungsstufen der Natur. "Sie vererben sich, wenn sie gut sind, gleichgültig warum und wie sie entstanden." [Rei 79, S.13]. Auch in der heutigen Zeit wird ein Raum nicht ausschließlich aus akustischen Gesichtspunkten geplant. Es sind viele verschiedene Forderungen zugleich zu erfüllen. Sichtbeziehungen, Beleuchtung, Belüftung, Zu- und Abgang, Platzkapazität, Finanzbedarf und vor allem die Gestaltung im Zeitgeist und in einer kulturell angepassten Atmosphäre. So galt es auch im Barockzeitalter ein Optimum zu schaffen, dass alle Anforderungen in einem harmonischen Ganzen vereint [Rei 79, S.13]. Auf der anderen Seite haben die alten Baumeister von den heute messtechnisch ermittelbaren Einzeleffekten der Akustik noch nichts konkret gewusst. Und was sie damals "erfühlt" haben kann heute nur noch schwer abgeschätzt werden [Rei 79, S.12]. Selbst wenn sie richtige Intuitionen gehabt haben, hätten sie diese nach der Meinung von Reichard nur schwer gegen die gesellschaftlichen oder funktionellen Forderungen durchsetzen können. Ein Architekt bestimmte so gut wie nie die Funktion seines Bauwerkes selbst und die Funktion und Gestaltung der Barocktheater war weitgehend vorgeschrieben [Rei 79, S.12].

Was die Konstruktion des Kapellenraumes in der "Himmelsburg" betrifft, konnte während der Erstellung dieser Arbeit keine Literaturquelle gefunden werden, die eindeutig belegt, aus welchem Anlass die Empore nachträglich errichtet wurde und die Rückschlüsse über den Grund der konstruktiven Durchbildung der Empore zulässt. Es konnte auch ganz allgemein nicht festgestellt werden, welche Erkenntnisse dieser Zeit auf dem Gebiet der Akustik tatsächlich und bewusst in konkreten Bauvorhaben angewendet wurden. Mit Newtons "Philosophiae naturalis principia mathematica" begann die theoretische Erforschung der bisher vorwiegend experimentell begründeten Akustik. Er lieferte das dafür notwendige Instrument mit der Differential- und Integralrechnung. Durch die Berechnung von verschiedensten Schwingungsproblemen und der Lösung von unterschiedlichen Wellengleichungen leisteten bedeutende Wissenschaftler des 18. Jahrhunderts, wie Brook Taylor, Jean Baptiste le Rond d'Alembert, Daniel Bernoulli, Joseph Louis Lagrange sowie Leonhard Euler, einen wesentlichen Beitrag für die Entwicklung der akustischen Wissenschaft [Ull 02, S.75]. Das erste Lehrbuch der modernen Akustik brachte im Jahr 1802 Ernst Florens Friedrich Chladni heraus, der mit seinen Klangbildern großes Aufsehen erregte. Aber erst nachdem Wallace Clement Sabine 1898 die mathematische Beziehung zwischen Nachhallzeit, Raumvolumen und absorbierender Fläche aufgestellt hatte, konnten gezielte Berechnungen zur Raumakustik durchgeführt werden [Röm 94, S.12].

2.4 Historische Phasen im Kirchenbau

Das Wort Kirche hat seinen Ursprung in dem alten griechischen Wort “kyriakon“, was soviel heißt wie “dem Herrn gehörig“ und meint in erster Linie die Gemeinde. Mit Gemeinde kann sowohl das Gebäude beschrieben werden, in der sich die Menschen zum Gottesdienst versammeln, als auch die Menschen selbst, die eine Gemeinde bilden [Clo 91, S.8]. Die Erklärung des Christentums zur Staatsreligion des Römischen Reiches im Jahr 380 [Ber 90, S.162] bewirkte große Veränderungen in vielen Bereichen der bis dahin verfolgten Kirche. Die kaiserliche Anerkennung ermöglichte prächtiger werdende Gotteshäuser. Die ersten Kirchen im Römischen Reich wurden architektonisch nach dem Vorbild der Basilika errichtet [Clo 91, S.32].

2.4.1 Entwicklung des christlichen Kirchenbaus

In der einfachsten Form war die Basilika eine lang gestreckte Halle mit einem säulengetragenen, hohen Mittelschiff und ein oder zwei niedrigeren Seitenschiffen [Fas 98, S.208]. Die östliche Giebelseite des Hauptschiffes war meist durch eine halbkreisförmige Apsis abgeschlossen [Clo 91, S.32]. Bei dem Bau der frühchristlichen Basilika wurden akustische Aspekte nicht berücksichtigt. Sie diente mehr oder weniger den liturgischen Handlungen [Fas 98, S.208]. Durch die mit Säulen stark gegliederten Wände wurde ein gut durchmischtes, diffuses Schallfeld erreicht und die aus Holz angefertigte Decke sorgte für günstige Anfangsreflexionen. Allerdings war die Musik- und Sprachverständlichkeit nicht besonders gut. Auf Grund der harten Oberflächenmaterialien und des verhältnismäßig großen Raumvolumens bildete sich ein langes Nachhallfeld aus und große Einbauten oder Gestühl, die den Schall absorbieren konnte, waren nicht vorhanden [Fas 98, S.208]. Im Laufe der Zeit passten die Christen die Grundform der Basilika an die jeweiligen Bedürfnisse der Liturgie an, womit die äußere Form des kirchlichen Gottesdienstes bezeichnet wird. Kapellen und Vorhallen wurden angebaut, Seitenflügel und Querschiffe eingefügt.

Im Mittelalter führten die Fortschritte in der Bautechnik zu einer Weiterentwicklung der römischen Basilika und damit zu einem neuen sakralen Baustil. Die Romanik breitete sich in ganz Europa aus und gab dem Sakralbau erstmals ein einheitliches architektonisches Gepräge, das den Machtzuwachs der Kirche ausdrückte. Die feierliche Wucht der Romanik entfaltete sich zu einer lebendigen, reich gegliederten Formensprache, die sich vor allem in dem immer reicher werdenden plastischen Schmuck der Kirchen bemerkbar machte [Clo 91, S.42]. Am Ende des 12. Jahrhunderts bildete sich ein neuer sakraler Baustil heraus, die Gotik. Sie baute aber nicht auf den Formen der Romanik auf. In der Gotik wurden neue Strukturen entwickelt, die ebenfalls auf die Grundrissform der griechischen Basilika zurückgehen. Wie in jeder Umbruchssituation sollten

die neuen sakralen Bauten die geistige Situation und das religiöse Bewusstsein der Zeit widerspiegeln. Die wesentlichen Merkmale der gotischen Kathedralen sind die hoch aufstrebende Raumwirkung, erreicht durch die tatsächliche Höhe betont mit einer markant vertikalen Linienführung, eine große Lichtdurchflutung des Raumes infolge Vergrößerung der Fensteröffnungen und die Einheitlichkeit, die sich in den zu einem Ganzen fügenden architektonischen Elementen darstellt. Die immer größer werdenden Dimensionen der kirchlichen Bauten repräsentierten die Machtstellung der Kirche [Clo 91, S.62].

Hinsichtlich der Akustik zeichnen sich romanische und gotische Kirchen durch ein deutlich ausgeprägtes Nachhallfeld aus. Der wesentlich größte Teil der Raumbegrenzungsflächen besteht aus Mauerwerk, welches im tiefen Frequenzbereich nicht absorbierend wirkt. Die wichtigsten Tiefenabsorber sind die Fenster, die nur einen Teil von 2% - 11% [Mey 03] an der Gesamtbegrenzungsfläche des Raumes ausmachen. Da auch sonst nur relativ wenige schwingungsfähige Flächen vorhanden sind, steigt in mittelalterlichen Kirchen die Nachhallzeit zu den tiefen Frequenzen hin tendenziell an [Mey 03, S.94]. Die Nachhallzeit mittlerer Frequenzen nimmt dabei, unabhängig von ihrem Frequenzverlauf, fast linear mit dem Volumen zu. Dabei muss zwischen Bauwerken mit offen liegendem Bruchsteinmauerwerk und verputzten Wandflächen unterschieden werden. Wegen der größeren Porosität eines offenen Mauerwerkes ist die Nachhallzeit in etwa nur zwei drittel so lang wie in einer entsprechenden Kirche mit verputzten Wandflächen und der Anstieg der Nachhallzeit mit Zunahme des Raumvolumens ist nicht so stark ausgeprägt [Mey 03, S.96]. Auch in den mittelalterlichen Kirchen sorgen die Säulengänge für ein diffuses, gut durchmisches Schallfeld. Allerdings wird die Verständlichkeit gesprochener Worte auf Grund der langen Nachhallzeit meist als schlecht eingestuft, beziehungsweise wird sogar teilweise die Verständlichkeit von Musikdarbietungen bemängelt [egg 99, S.1]. Der Grund für diese Entwicklungstendenz liegt in der damals üblichen, kirchlichen Zeremonie. Die Messe wurde ausschließlich in lateinischer Sprache gehalten und die zugehörigen Gesangsabschnitte wurde selten mit einem Instrumentarium begleitet. Es galt eher eine emotionale Gemeinschaft aufzubauen als eine informative Verarbeitung des gesprochenen und gesungenen Wortes zu erreichen [Ahn 80, S.14].

Im 15. und 16. Jahrhundert entwickelte sich das neue Menschenbild der Renaissance, welches sich auf das kulturelle, politische, wirtschaftliche sowie kirchliche Leben auswirkte. Der Mensch wurde, zwischen Gott und Welt gestellt, als eigenes, freies und von religiösen Bindungen befreites Individuum gesehen [Clo 91, S.70]. Zur gleichen Zeit versuchte die Reformation die religiöse Verbindung zwischen Mensch und Gott zu erneuern. Die Reformatoren lehnten aber viele traditionelle kirchliche Praktiken ab. Besonders der Reichtum der christlichen Kirche hatte für sie keine biblische Begründung und untergrub damit die wesentlichste Botschaft: allein der Glaube an Jesus Christus führt zu Gott. Begünstigt durch technische Entwicklungen im Buchdruck fand das reformatorische Gedankengut eine rasante Verbreitung. Nicht nur das gewöhnliche Volk, auch Fürsten, Gelehrte und Künstler schlossen sich bald dem Protestantismus an. Das Europa des 16. Jahrhunderts war unwiderruflich zwischen Protestanten und Katholiken gespalten [Clo 91, S.72].

2.4.2 Entwicklung des protestantischen Kirchenbaus

Während im Katholizismus die feierliche Wiederholung des Opfertodes Jesu am Altar das Zentrum des Gottesdienstes darstellte, rückten die Reformatoren die Predigt mit der Verkündung der Heiligen Schrift von der Kanzel in den Mittelpunkt und versuchten so möglichst viele Zuhörer möglichst nah um den Geistlichen zu scharen. Aller Schmuck und alles Repräsentative waren unnötig für die protestantische Liturgie. Die bestehenden Bauwerke wurden den neuen Bedürfnissen angepasst, indem Bilder, Chorschränke und zum Teil Altäre entfernt worden [Clo 91, S.72]. Die alten, nun leer geräumten Kirchen müssen aber für das Hören der Predigt akustisch ungeeignet gewesen sein.

In protestantisch gesinnten Landesteilen wurde daraufhin versucht die liturgischen Gesichtspunkte bei dem Bau neuer sakraler Gebäude in die Architektur mit einzubeziehen. Im Laufe der Zeit wurde dabei eine Vielzahl an Grundrissvarianten ausprobiert, denen eines gemeinsam ist. Alle versuchten Abendmahlstisch, Taufbecken und vor allem die Kanzel ins Zentrum des kirchlichen Geschehens zu rücken [Clo 91, S.74]. Es gibt eine Fülle an Literatur, die sich mit dem Thema des protestantischen Kirchenbaus im 17. und 18. Jahrhundert auseinandersetzt. Grundlegende Arbeiten entstanden vorwiegend in den Bereichen der Theologie und Architektur, die oftmals von der Suche nach der idealen protestantischen Kirche geprägt sind. Als Quintessenz aller Arbeiten kristallisiert sich eines heraus: "die protestantische Kirche gibt es nicht!" [Wex 84, S.II]. Vielmehr ist die Vielzahl der angewendeten Formen, besonders der Grundrissaufteilungen, als ein wichtiges Charakteristikum des protestantischen Kirchenbaus anzusehen.

Mit Betrachtung der vielen möglichen Grundrissformen kommt Reinhold Wex zu der Überzeugung, dass der protestantische Kirchenbau nicht von der zugehörigen Liturgie abhängig sein kann. Diese forderte im Wesentlichen nur zwei Dinge: gute Sicht und gute Akustik für alle Teilnehmer des Gottesdienstes. Nach Martin Luther wäre dies unter Umständen auch in einem Saustall gegeben. Da dieser aber nicht den Ansprüchen genügte, muss bei aller Distanzierung vom Katholizismus festgestellt werden, dass auch im Protestantismus die Kirche ein Repräsentationsgebäude zu sein hatte [Wex 84, S.V].

Der seit 1513 in Weimar regierende Herzog Johann hatte ein großes Interesse an der lutherischen Lehre und dies dürfte der Grund gewesen sein, dass der Reformator auch häufig in Weimar predigte. Damit wurde Weimar zum "Schnittpunkt aller Differenzierungen, die sich in der reformatorischen Volksbewegung in Thüringen herausbildeten" [Jac 99, S.55]. Auch sein Sohn Johann Friedrich der Großmütige unterstützte die Verbreitung reformatorischen Gedankengutes. Besonders mit dem 1525 erlassenen Befehl, ausschließlich evangelisch zu predigen, wurde die Durchsetzung der Reformation in Weimar wesentlich gefördert [Jac 99, S.56]. Bei der Schlacht von Mühlberg unterliegt er 1547 allerdings endgültig Kaiser Karl V. und der ihm angehörigen "katholischen Liga". Infolge der Niederlage wurde er degradiert, verlor Kurwürde und große

Landesteile [Bot 00, S.12]. Seine Konfession behielt er aber bei, wie auch folgende Generationen der in Weimar residierenden ernestinischen Linie Protestanten waren. Bei der Schlosskapelle der „Wilhelmsburg“ handelt es sich demnach um einen nach protestantischen Gesichtspunkten entworfenen Neubau. Die markanten Merkmale einer protestantischen Kirche sollten aus diesem Grund etwas näher betrachtet werden.

Bei der Suche, was denn eine protestantische Kirche ausmache, erkennt 1938 W. Grashof in der „zentralisierenden Tendenz“ eine Grundstruktur jeder protestantischen Kirche [Wex 84, S.III]. Bei Neubauten wurde beispielsweise der Typ einer offenen Saalkirche bevorzugt, die weniger lang gestreckt ist und damit auch den barocken Raumvorstellungen näher kam [Mey 03, S.91]. In Bezug zu den gotischen Hallen strebte der Protestantismus ein kleineres Raumvolumen an, was die Nachhallzeit wesentlich verkürzte und damit der Verständlichkeit gesprochener Worte entgegen kam. Aber das wesentlichste Element einer „Zentralisierung“ sieht Wex in den Emporen mit ihrer raumzentrierenden und raumschichtenden Wirkung. Er stellt fest, dass es die Emporen sind, die eine Kirche zu einer protestantischen machen [Wex 84, S.III]. Emporen sind damit eines der wichtigsten „raumgestaltenden Faktoren“ im deutschen protestantischen Kirchenbau.

Die Empore galt lange als praktische Folge des protestantischen Kirchenbaus, da nur durch sie die Möglichkeit gegeben ist eine große Gemeinde vollständig zum Gottesdienst zu versammeln. Doch die Emporen dienten nie ausschließlich der reinen Platzbeschaffung im Kirchenraum [Wex 84, S.116]. In der Kunstgeschichte hatten die Emporen neben ihrer ästhetischen vor allem eine Separierungsfunktion. Beispielsweise wurden in der Apostelkirche des byzantinischen Reiches die verführerischen Frauen auf Emporen platziert, während die Männer im Kirchenschiff den Gottesdienst gestalteten. In späteren, westlichen Bauten sind beide Geschlechter in eine Ebene des Kirchenraumes gelegt worden, so dass die Empore eine weitere Funktion übernehmen konnte. Die Aufnahme des Herrschersitzes und damit die Trennung von Herrschaft und Gesinde [Wex 84, S.118]. Aber auch ein direkter Zugang von den Wohnräumen der herrschenden Klasse in die Kirche konnte so mühelos erreicht werden. Emporen wurden demnach auch im Protestantismus installiert, um weltliche Würdenträger und die feudale Obrigkeit im öffentlichen Kirchenraum repräsentativ und dem Volk übergeordnet zu platzieren [Wex 84, S.118].

Eine Verbesserung der akustischen Situation im Kirchenraum infolge des Einbaus von Emporen war im einfachsten Fall schon dadurch gegeben, dass mit den teilweise über drei Etagen angeordneten Emporen nicht so viel Platz wie in einer gotischen Anlagen benötigt wurde, um die gleiche Anzahl an Gemeindemitgliedern zur Messe versammeln zu können [Mey 03, S.91]. Folglich war ein geringeres Raumvolumen ausreichend. Aber auch durch den nachträglichen Einbau von Emporen in ein vorhandenes Kirchengebäude ist eine Verkürzung der Nachhalldauer spürbar gewesen. Emporen sind meist als Holzkonstruktion entworfen worden und wirkten mit den schwingungsfähigen Brettern als großflächige Schallabsorber hauptsächlich im tiefen Frequenzbereich. Die Emporen der Weimarer „Himmelsburg“ wurden nicht nachträglich errichtet

sondern schon in dem Entwurf vorgesehen. Ihre Konstruktion unterschied sich aus diesem Grund von den nachträglich errichteten Emporen, da sie architektonisch in den Innenraum integriert waren. Der von unten sichtbare Deckenteil bestand aus einem gemauerten Gewölbe. Der Boden der Emporen ist als eine Holzbalkendecke ausgeführt worden. Auf Grund des Hohlraumes zwischen Holzdielen und Gewölbe wird hier, ähnlich wie bei nachträglich errichteten Emporen, eine beachtliche Tiefenabsorption wirksam gewesen sein.

Ein weiteres Merkmal der Zentralisierung ist die veränderte Bedeutung der Kanzel. Sie ist in den Kirchen der Reformation, mit ihrem besonderen Interesse an der Predigt, der Hauptorientierungspunkt im Innenraum und von daher auf den Altar bezogen. Im 13. Jahrhundert gab es noch keine fest eingebauten Kanzeln. Diese entstanden erst mit dem wachsenden Verlangen nach einer verständlicheren Form der Verkündung der Bibel in der Landessprache. Bis dahin ist von der Chorschranke oder vom Lettner (abgeleitet von lat.: *lectorium* – Lesepult/Lesestube) aus gepredigt wurden oder ein kleines hölzernes Podest wurde an einer akustisch günstigen Stelle platziert, um die sich die Zuhörer sammeln konnten [Mey 03, S.92]. Mit Zunahme der Bedeutung der Predigt musste ein fester Platz innerhalb der Kirche gefunden werden. Bevorzugt sind Kanzeln an einer mittleren Säule der Nordseite des Mittelschiffs angeordnet worden. Hier war eine günstige Sprachverständlichkeit gegeben und die Gemeinde konnte sich gut um die Kanzel gruppieren [Mey 03, S.92]. Die protestantische Kirche verlangte einen zentralen Aufstellungsort der Kanzel, so dass diese den Raum oft nach Osten hin abgeschlossen hat. Als die protestantischen Kirchen vermehrt mit zusätzlichen Emporen ausgestattet worden, wuchsen die Kanzeln hoch hinauf, so dass der Prediger auch die auf der Empore Sitzenden ansprechen konnte [Clo 91, S.74]. Dies führte außerdem zu einer Verbesserung der Verständlichkeit in der Hauptebene des Kirchenschiffs, da auch die hintersten Reihen besser mit Direktschall versorgt worden sind.

In lutherischen Kirchen ist die Kanzel des Öfteren direkt über dem Altar errichtet worden, so dass beide eine Einheit bildeten: den so genannten Kanzelaltar [Clo 91, S.26]. Im ernestinischen Herrschaftsgebiet wurde ein solcher Baldachinkanzelaltar erstmals in der Weimarer Schlosskapelle verwendet. Er stellt einen Teil der protestantischen Entwicklung dar, die als liturgische Besonderheit des Luthertums im ernestinischen Sachsen gilt. Diese erforderte einen zentralen Aufstellungsort der Kanzel, was eine enge Verbindung zwischen gesprochenen Wort und Sakrament, den Hauptelementen des Evangeliums, ermöglichen sollte [Bot 00, S.24]. Von Weimar aus verbreitete sich diese Form des Kanzelaltars weit bis ins 18. Jahrhundert hinein. In der näheren Umgebung lassen sich noch heute ähnliche Altäre finden, beispielsweise in Niedergrunstedt und in Tiefurt.

Um die Verständlichkeit des gesprochenen Wortes weiter zu verbessern, sind über den Kanzeln oftmals ebene oder gewölbte Schalldeckel angeordnet worden, die günstige, zeitige Reflexionen erzeugen. Ob diese Konstruktion in seiner Wirkungsweise so beabsichtigt war, ist ungewiss, aber offenbar hatte man gute Erfahrungen damit gemacht [Mey 03, S.92]. Der Kanzelaltar der

Weimarer Schlosskapelle besaß zumindest keinen Schalldeckel, was eine Untersuchung von Deutlichkeit und Verständlichkeit der menschlichen Sprache sehr reizvoll gestaltet, bei der Ergebnisbetrachtung aber unbedingt berücksichtigt werden sollte.

Auch das Kirchengestühl war eine Erneuerung. In heutigen Kirchen sind Bänke und Stühle selbstverständlich. Bis zum 15. Jahrhundert war es aber nicht gebräuchlich in der Kirche zu sitzen. Ausschließlich für den Klerus war im Chorbereich ein Gestühl vorgesehen [Fas 98, S.208]. Damit bot der freie Kirchenraum eine günstige Vorraussetzung für einen Gottesdienst zwischen mehreren Stationen [Mey 03, S.92]. Später wurde es üblich, dass jeder Teilnehmer des Gottesdienstes seine eigene Sitzgelegenheit mitbrachte, bis einige Gemeinden begannen Stühle bereitzustellen. Erst in der Reformationszeit, in der besonderer Wert auf die Predigt gelegt wurde, erschienen Sitzreihen in den Kirchen [Clo 91, S.28]. Bereits die 1544 von Martin Luther eingeweihte Schlosskapelle in Torgau besaß fest eingebaute Bänke im Kirchenschiff sowie auf den Emporen. Durch das Gestühl wurde das Geschehen direkt auf die Kanzel fixiert, so dass die Predigt von allen Gottesdienstteilnehmern gut verfolgt werden konnte [Mey 03, S.93]. Allerdings entstand ein größerer Abstand zwischen Geistlichen und den hinteren Bankreihen in Bezug zu einer gleichen Anzahl an stehenden Zuhörern. Andererseits lässt sich besonders eine lange Predigt im Sitzen konzentrierter verfolgen und ein sitzendes Publikum birgt kein so großes Unruhepotential wie eine stehende Menschenmenge [Mey 03, S.93].

An einer freien Bodenfläche wird der Schall ungehindert reflektiert. Die vorwiegend aus harten, glatten Materialien bestehenden Fußböden bewirken somit eine Verlängerung der empfundenen Nachhalldauer. Ist ein Kirchengestühl vorhanden, wird der Schall mehrfach gebrochen und stark diffus gestreut. Ein eingebautes Kirchengestühl hat damit einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf das Schallfeld. Gebräuchliche Sitzgelegenheiten zu Bachs Zeiten waren vorwiegend einfache Holzbänke mit hoher Rückenlehne, die deutlich mehr Schall absorbieren als ein loses Gestühl [Mey 03, S.163]. Wirksam ist die Absorption im ganzen relevanten Frequenzbereich, zu den hohen Frequenzen hin leicht zunehmend. Polsterauflagen, wie sie heute oft in Kirchen zu finden sind, waren jedoch nicht üblich. Solche Sitzpolster schaffen einen Ausgleich der Nachhallverhältnisse zwischen einem mehr oder weniger stark besetzten Raum, da sie eine ähnliche Frequenzcharakteristik aufweisen wie die von anwesenden Personen [Mey 03, S.112]. Über die Art und Weise der Bestuhlung der "Himmelsburg" kann keine genaue Aussage getroffen werden. Für die akustische Untersuchung wird von traditionellen Holzbänken ausgegangen, wie sie noch heute beispielsweise in der Kapelle von Schloss Augustusburg in Weissenfels vorhanden sind (Abb. 3.29).

Die reformierte Kirche wollte die Konzentration vom künstlichen Beiwerk in der Kirche auf die Predigt lenken [Clo 91, S.74]. Infolgedessen waren Bilder und Schmuck im Kirchenraum unerwünscht. Parallel dazu ging die aufkommende barocke Architektur, die auch in protestantischen Neubauten ihre Anwendung fand, von glatten Wandstrukturen in eine plastischere Gliederung der

Raumbegrenzungsflächen mit feinstrukturierten Elementen über [Ahn 80, S.14]. In diesem Zusammenhang sind protestantische Kirchen durchaus weniger “geschmückt“ und nüchterner eingerichtet als im gleichen Zeitraum erbaute katholische, aber auch hier fanden Skulpturen, Draperien und Dekorationen eine Anwendung. Die Voraussetzungen für ein hohes Maß an Diffusität, und damit für eine gute Durchmischung des Schalls, waren demnach auch in der reformierten Kirche gegeben. Auf Grund der hinzugekommenen Einbauten, besonders der Emporen, ist ein Charakteristikum barocker Kirchen die abfallende Tendenz der Nachhallkurve zu tiefen Frequenzen hin [Mey 03, S. 113]. Die Größe und Frequenzlage des resultierenden Nachhallmaximums hängt dabei von dem Raumvolumen und der Art der Innenausstattung ab. Wie bei den mittelalterlichen Kirchen steigt auch bei den Barockkirchen die Nachhallzeit mittlerer Frequenzen mit zunehmenden Volumen an. Jedoch ist der Anstieg bei Räumen unterhalb von etwa 4000m³ wesentlich flacher als bei größeren Räumen, die sich ähnlich wie die gotischen Kirchen verhalten [Mey 03, S.114].

3 Architektonische Rekonstruktion der Schlosskapelle

Die christlichen Kirchen spiegeln durch ihre über tausendjährige Baugeschichte das Leben in ihrer jeweiligen Entstehungszeit wider. Die typische Atmosphäre eines Sakralraumes wird durch viele Einflüsse geprägt, aber besonders – bewusst oder unbewusst – durch visuelle und klangliche Eindrücke wahrgenommen. Die akustischen Eigenschaften haben deshalb an der Gesamtwirkung eines Raumes, die sich aus der Kombination unterschiedlicher Sinneswahrnehmungen zusammensetzt, einen wesentlichen Anteil.

Wie die optische Wirkung sind auch die physikalisch ermittelbaren, akustischen Parameter von der räumlichen Situation – den Proportionen, Oberflächenstrukturen, Verzierungen und dem Inventar – abhängig. Geometrie und Materialien haben einen wesentlichen Einfluss auf die akustische Qualität eines Raumes, so dass Raumgestaltung und Akustik in einem unmittelbaren, engen Wechselverhältnis stehen. Zu Beginn der raumakustischen Untersuchung der “Himmelsburg” war deshalb eine umfangreiche Recherche nach vorhandenen Quellen notwendig, aus denen die Geometrie abgeleitet werden konnte.

Grundlage für die akustische Rekonstruktion bildet die detaillierte Darstellung der Schlosskapelle an Hand von Grundrissen, Schnitten und Ansichten aus der architektonischen Rekonstruktion von Scharfe aus dem Jahr 2004. Die “Primärstruktur” des Raumes, das heißt die Geometrie in Grund- und Aufriss, wurden anhand dieser Quellenlage erstellt. Die Ergebnisse dieser Rekonstruktion werden in diesem Kapitel vorgestellt und mit eigenen Erkenntnissen ergänzt. Ferner werden Informationen über Oberflächenmaterialien und Hinweise zur konstruktiven Ausbildung einzelner Bauteile gegeben. Die Vermaßung der dargestellten Grundrisse und Schnitte beruht auf dem verwendeten akustischen Simulationsmodell.

3.1 Geometrische Rekonstruktion

Um 1657 ordnete Herzog Wilhelm IV. einen Umbau der bestehenden Schlosskapelle an. Er ließ die Decke mittig über dem Kirchenschiff öffnen und darüber eine weitere Empore erbauen. In der so genannten “Capella“ wurde die Orgel untergebracht, sie diente bei musikalischen Vorführungen zur Aufnahme der Musiker und des Chores. Über dem Altar ließ Herzog Wilhelm IV. eine Kanzel errichten, die durch ihre Größe den Raum stark dominierte. In ihrer Form und Gestalt ein Baldachinkanzelaltar, betonte sie mit ihrem pyramidalen Aufsatz die Öffnung in der Decke und stellte eine optische Verbindung zwischen Orgel und Altar her. Betreten werden konnte der Kanzelaltar nur über eine zusätzliche Altarempore, die hinter der Kanzel angeordnet war und die gesamte Breite des Raumes einnahm. Unterhalb des Altares ließ sich der Herzog eine Gruft errichten. Dabei kam es vermutlich auch zur Absenkung des Fußbodens im Chorbereich und der Verwendung eines neuen Bodenmaterials [Sch 04/1, S.10].

Im Jahr 1658 waren die Umbauarbeiten abgeschlossen und die Schlosskapelle wurde geweiht [Bot 00, S. 24]. Durch die vorgenommenen Veränderungen des Raumes ist auch die Akustik entscheidend beeinflusst worden. Die akustische Rekonstruktion der “Himmelsburg“ bezieht sich aus diesem Grund ausschließlich auf den Zeitraum der nachfolgenden 115 Jahre, bis 1774.

3.1.1 Quellenauswertung

Es ist nur eine relativ geringe Anzahl an Quellen vorhanden, die einen eindeutigen Aufschluss über den Zustand der Schlosskapelle zwischen 1658 und 1774 liefern. Der Großteil des verwendeten Materials stammt von Angehörigen der Richterschen Familie, die den Schlossbau ab Bonalinos Baubeginn recht ausführlich in Form von Gemälden und Zeichnungen dokumentierten [Bot 00, S.17]. Einzelne Bauphasen und Details sind gut erkennbar und damit hilfreich für die akustische Rekonstruktion. Allerdings können den überwiegend perspektivischen Zeichnungen keine genauen Maße entnommen werden.

Neben den Richterschen Zeichnungen sind verschiedene Grundrisse erhalten geblieben. Bei einigen ist allerdings die Herkunft nicht genau bekannt, so dass deren Glaubwürdigkeit zu hinterfragen ist. Die von Bonalino und Richter angefertigten Pläne weisen in einigen Details gravierende Unterschiede auf. Beispielsweise befinden sich die Treppenhäuser zur Erschließung der Emporen an unterschiedlichen Standorten im Grundriss. Ob es sich bei den angefertigten Zeichnungen um Entwürfe handelt oder um Pläne die tatsächlich zur Bauausführung gekommen sind, kann nicht eindeutig belegt werden [Sch 04/1, S.24]. Das umfangreichste Aufmaß wurde von

Johann David Weidner etwa um 1750 angefertigt [Bot 00, S.35]. Es umfasst die Grundrisse aller Geschosse der kompletten Schlossanlage. Da die Außenmauern bei dem Schlossbrand von 1774 vollständig erhalten geblieben sind und in den darauf folgenden Neubau integriert wurden, konnte die Qualität der Weidnerschen Grundrisse durch ein Aufmaß aus dem Jahr 2000 untermauert werden. Die einzelnen Grundrissvarianten sind vor der eigentlichen Rekonstruktion untersucht und miteinander verglichen worden. Auf Grund der hohen Maß- und Winkelgenauigkeit und der eindeutig belegbaren Herkunft bezieht sich die Rekonstruktion vorwiegend auf das Aufmaß von Weidner (Abb. 3.1) [Sch 04/1, S.23].

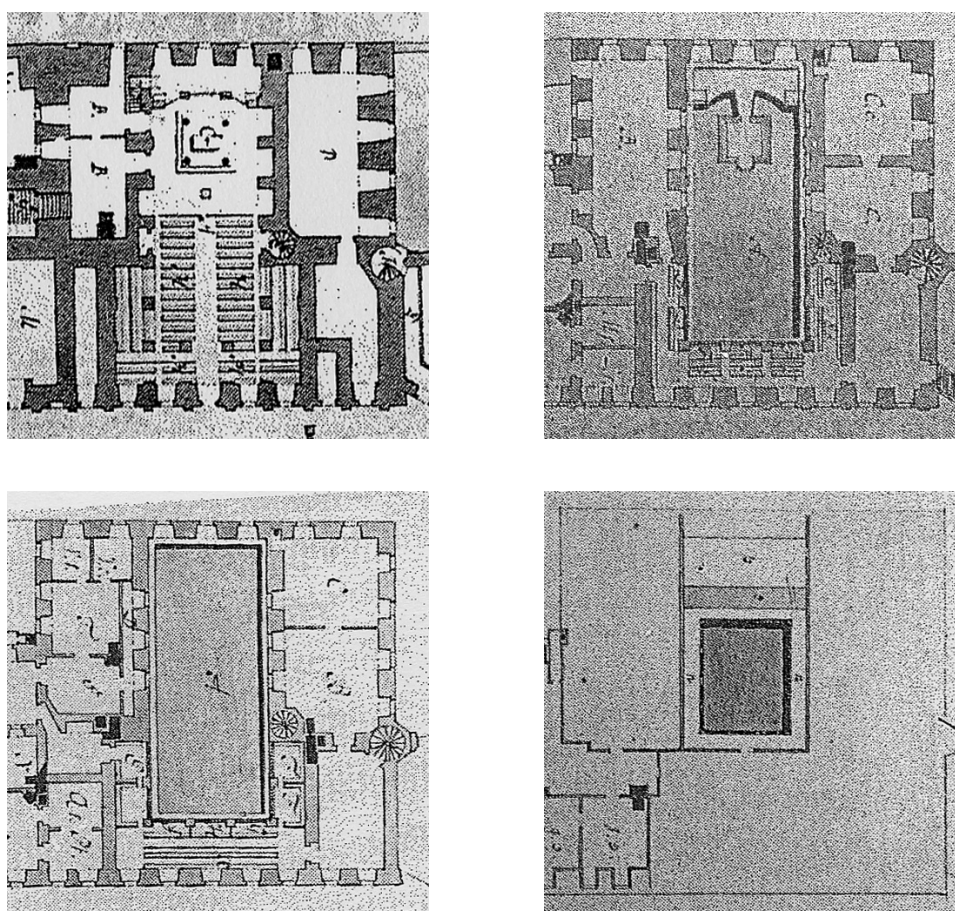


Abb. 3.1: Grundrisse nach Weidner, von oben links nach unten rechts: Erdgeschoss, 1.Obergeschoss, 2.Obergeschoss, Dachgeschoss, um 1750, [Bot 00, S. 122/123]

Weidner verzichtete allerdings auf Schnitte und Ansichten sowie auf die Darstellung von Details und Einrichtungen. Er kartierte lediglich die Ausmaße im Grundriss. Für die Rekonstruktion der Höhenentwicklung des Raumes und die konstruktive Ausbildung baulicher Details wurden die zahlreichen Skizzen und Zeichnungen aus der Bestandszeit herangezogen [Sch 04/1, S.23]. Parallel dazu stand die Suche nach geeigneten Vergleichsobjekten.

Besonders die Schlosskapelle im Schloss Neu-Augustusburg in Weißenfels war für die Rekonstruktion der “Himmelsburg“ von großer Bedeutung. Die Kubatur der gesamten Schlossanlage ist mit dem damaligen Weimarer Schloss vergleichbar. Der in Weimar angestellte Johann Moritz Richter wurde bei dem Bau des Weißenfelser Schlosses ab der Grundsteinlegung im Jahr 1660 [Sch 04/1, S.16] als Baumeister eingesetzt. Das Konzept für die neue Schlossanlage baute er auf dem Entwurf Bonalinos für das Weimarer Schloss auf. Aus diesem Grund ist die Kapelle in ihren Proportionen der Weimarer sehr ähnlich (Abb. 3.3). Ein gravierender baulicher Unterschied, auch aus akustischer Sicht, besteht in der Deckenausbildung im Kirchenschiff. Während in Weimar eine flache Decke den Raum nach oben abschloss, überspannt in der Weißenfelser Schlosskapelle ein Tonnengewölbe das gesamte Kirchenschiff (Abb. 3.2).



Abb. 3.2: Schloss Neu-Augustusburg in Weißenfels, v.l.: Tonnengewölbe mit Orgel, Blick von der Altarempore, Zustand 2004, [Sch 04/1, S.17]

Parallel zum Weimarer Schlossbau war Johann Moritz Richter ab 1643 [Sch 04/1, S.17] bei dem Bau des Schlosses Friedenstein in Gotha beteiligt. Auf Grund der gleichen Bauzeit und der Beteiligung des gleichen Architekten wurde die Gothaer Kapelle zum Vergleich herangezogen. In der Kubatur weicht diese jedoch stark von der “Himmelsburg“ ab, so dass hinsichtlich der Geometrie keine neuen Erkenntnisse gewonnen wurden. Aber die typisch barock ausgeführte Ausstattung liefert Anhaltspunkte für die Rekonstruktion. Beispielsweise gibt das Kirchengestühl aus der Zeit um 1750 [Sch 04/1, S.18], in Form einfacher Holzbänke, Hinweise auf eine mögliche Bestuhlung der Weimarer Schlosskapelle.

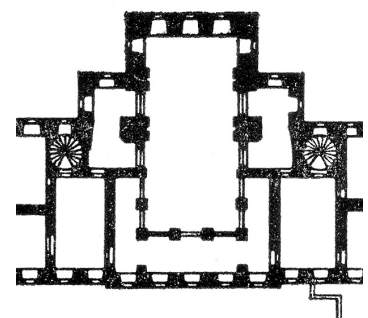


Abb. 3.3: Grundriss Schloss Neu-Augustusburg, 1976, [Sch 04/1, S.12]

Der Kanzelaltar in der Pfarrkirche St. Christopherus von Tiefurt hat eine ausgesprochen starke Ähnlichkeit mit dem aus der Weimarer Schlosskapelle. Größe und Gestaltung sind allerdings sehr verschieden, da die Kirche wesentlich kleiner ist. Das Grundprinzip eines säulengetragenen Baldachins mit pyramidalem Aufsatz ist aber gleich. Die Nähe Tiefurts zu Weimar und eine ähnliche Bauzeit (1715-25) erlauben einen Vergleich der beiden Kanzeln [Sch 04/1, S.20]. Für die akustische Rekonstruktion ist besonders der Aufbau des großvolumigen Aufsatzes von Bedeutung und kann hier näher untersucht werden (Abb. 3.4). Eine weitere Analogie zur Weimarer Schlosskapelle besteht in dem verwendeten Fußbodenmaterial aus Ziegelplatten [Sch 04/1, S.20].



Abb. 3.4: Kanzelaltar der Tiefurter Dorfkirche, 2004, [Sch 04/1, S.20]

3.1.2 Grundrisse

Der dreigeschossige Kirchenbau Bonalinos schloss direkt an die südliche Ringmauer der Schlossanlage an. Die einschiffige Kapelle war mittig in den neunachsigen Pavillonbau eingebunden. Nach Osten hin wurde der Raum durch den fünf Achsen umfassenden Chorbereich (Achse 1 – 5) abgeschlossen. Der einzige Zugang von außen lag auf der Westseite. Vom Hof aus gelangte man mittig in das Langhaus, dass mit den umlaufenden Emporen auch als dreischiffige Halle angesehen werden kann. Das Langhaus als Bereich für die Gottesdienstteilnehmer umfasste ebenfalls fünf Achsen (Achse 5 – 9). Es wurde baulich durch einen Höhengsprung im Fußboden sowie einem barocken Ballustergeländer von dem Chorbereich getrennt. Optisch bildeten beide Raumbereiche aber eine Einheit. Die “Himmelsburg“ war ein Zentralbau, ein mögliches Indiz barocker Raumvorstellungen, aber auch ein Merkmal des protestantischen Kirchenbaus (Kap. 2.4.2, S. 34, Abs. 2).

Die Schlosskapelle war durch eine strenge Symmetrie geprägt, ein weiteres Charakteristikum der Barockarchitektur (Kap.2.3.1, S.24, Abs.1). In Nord-Süd und Ost-West-Richtung wurde das gleiche Achsmaß gewählt (siehe Abbildungen der Grundrisse) und bauliche Details unterlagen einer symmetrischen Anordnung. Über ein Treppenhaus im Süden konnten die Emporen der oberen Geschosse vom Kirchenschiff aus erreicht werden. Um die symmetrische Wirkung aufrecht zu erhalten, wurde auf der gegenüberliegenden Seite eine Scheintür angeordnet.

Ähnliches ist in den Obergeschossen wieder zu finden. Mit den Nachbarräumen war die Kapelle über Fensteröffnungen verbunden. Auf der Südseite fehlten im ersten Obergeschoss teilweise die Durchbrüche (Abb. 3.6), deren Vorhandensein durch Blendfenster vorgetäuscht wurde. Auf der Nordseite schlossen im Chorbereich zwei Räume an, die als Sakristei dienten [Sch 04/1, S.26]. Die Räume auf der Südseite konnten von der Kirche nicht direkt erreicht werden. Die Zugänge für die nördlichen Nebenräume fanden aber auf der Südseite ein Pendant in nischenförmigen Vertiefungen. Die Symmetrie bezog sich hauptsächlich auf die Längsseiten, so dass der Raum in der Ost-West-Richtung eine ausgeprägte Axialität aufwies. Diese wurde zusätzlich durch den zentralen Aufstellungsort des Kanzelaltars im Chorbereich verstärkt.

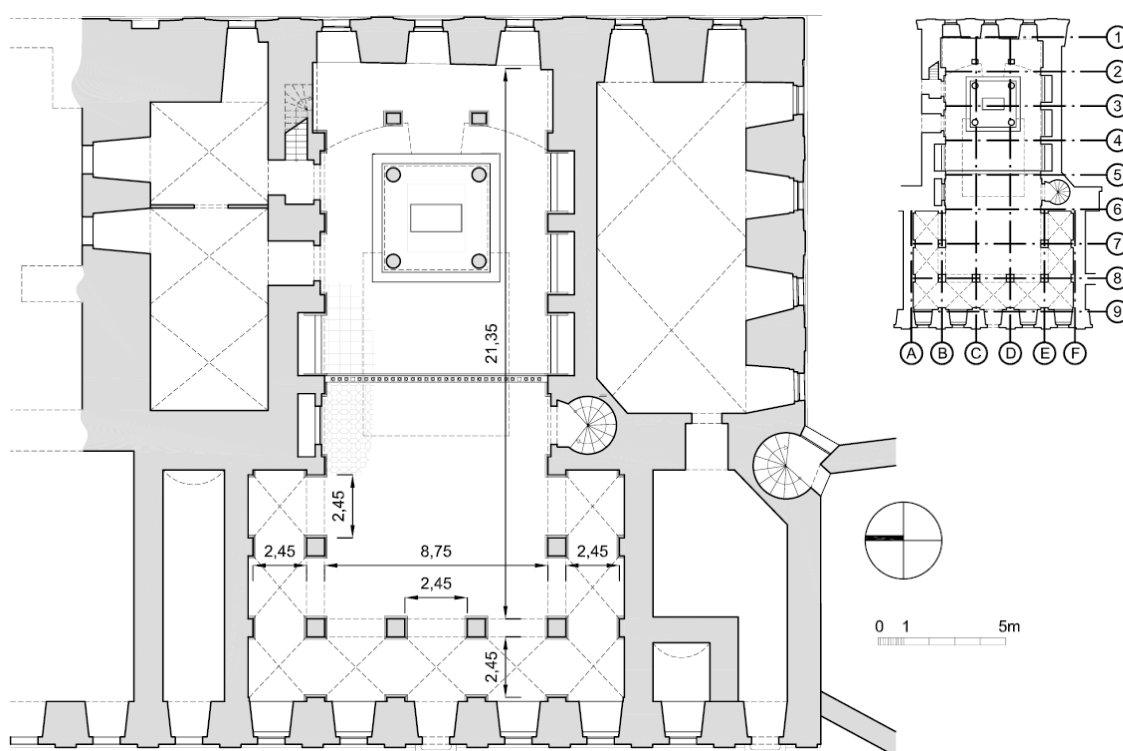


Abb. 3.5: Rekonstruktion, Grundriss Erdgeschoss, in Anlehnung an [Sch 04/1]

Die umlaufenden Emporen in beiden Obergeschossen weisen darauf hin, dass Bonalino bei dem Entwurf der “Himmelsburg” wahrscheinlich auch Gesichtspunkte protestantischer Liturgie berücksichtigte. Die Emporen konnten nicht nur über das Treppenhaus im Kirchenschiff erreicht werden, sondern waren auch über den nördlich anschließenden Schlossbereich zugänglich. Vermutlich konnte so die herzogliche Familie direkt von ihren Gemächern aus auf die Emporen gelangen, ohne den Haupteingang benutzen zu müssen (Kap.2.4.2, S.34, Abs.3). Hinweise darauf geben auch die Schlosskapellen in Gotha und Weißenfels, bei denen diese Möglichkeit zumindest

besteht [Sch 04/1, S.28]. Die Schlosskapelle zur “Wilhelmsburg” bot folglich die Möglichkeit einer hierarchischen Separierung der Stände und Geschlechter. Den Ausgangspunkt dieser Besonderheit in der sakralen Architektur bildet vermutlich die Schlosskirche von Schloss Hartenfels in Torgau, zu deren Weihe 1544 Martin Luther die Predigt hielt [Wex 84, S.VI].

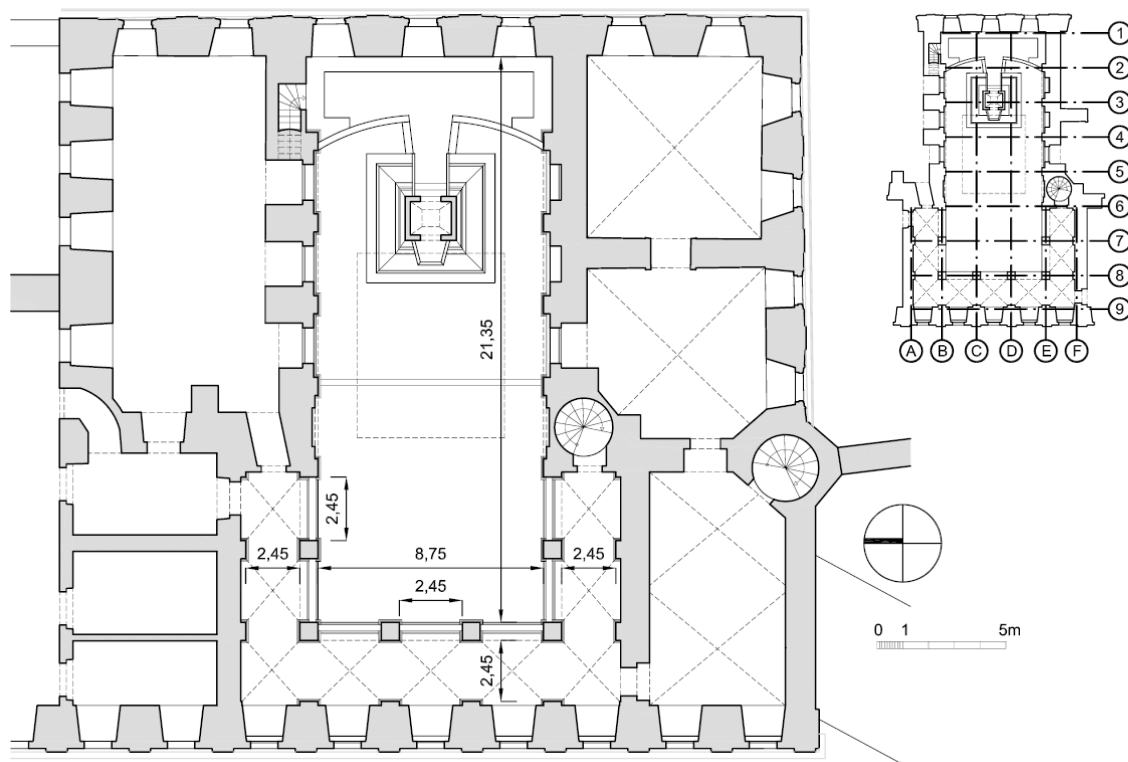


Abb. 3.6: Rekonstruktion, Grundriss 1.Obergeschoss, in Anlehnung an [Sch 04/1]

Eine exakte Rekonstruktion des Dachgeschosses ist nicht möglich. Wahrscheinlich handelte es sich um vier rechtwinklig zueinander stehende Satteldächer mit einheitlicher Firsthöhe, die parallel zu den Außenwänden verliefen [Sch 04/1, S.32]. Diese schlossen im Zentrum die Musikerempore ein, deren Abmessungen aus dem Grundriss nach Weidner bekannt sind. Die genaue Form und Ausbildung von Wänden und Überdachung kann daraus aber nicht abgeleitet werden. Auch auf vorhandenen Zeichnungen dieser Zeit wird der Kapellenraum nicht dargestellt, da seine Höhe den First der umgebenden Dächer nicht überschritten haben wird. Einzig auf dem Gemälde der Abb. 2.6, aus einer erhöhten Position heraus, wird die Vermutung einer Kuppelüberdachung bestätigt. In einem vergrößerten Ausschnitt (Abb. 3.9) ist die allgemeine Gestalt der Kuppelform zumindest ansatzweise zu erkennen.

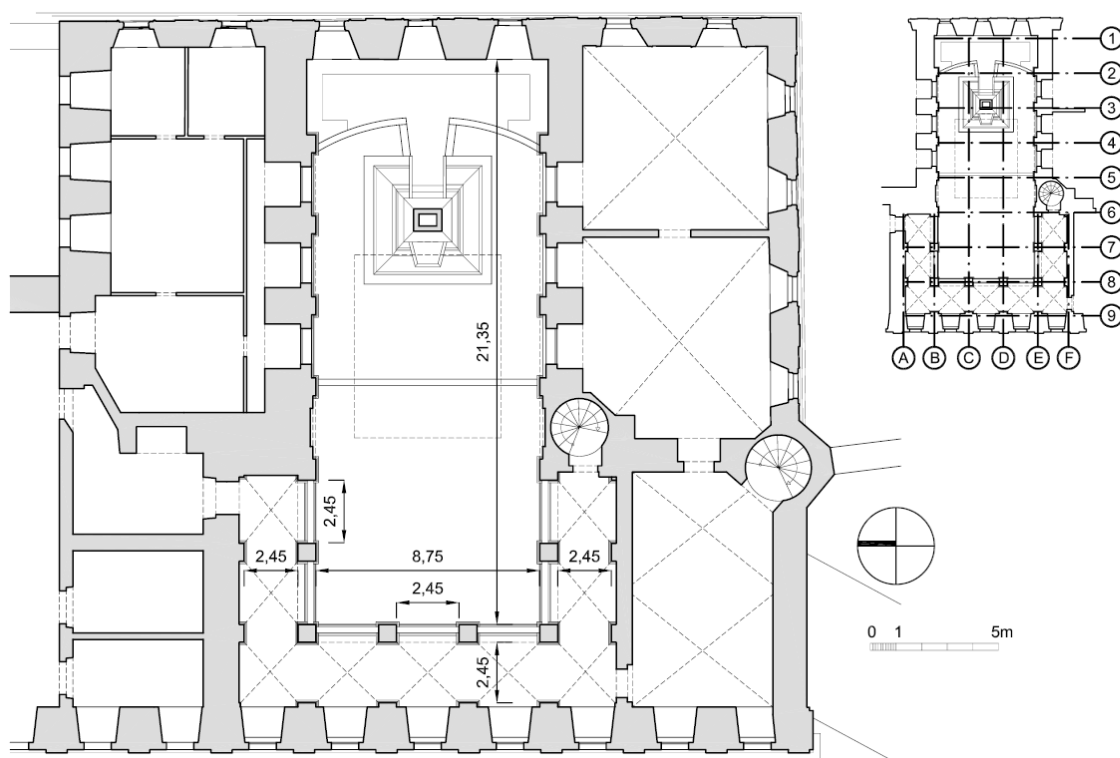


Abb. 3.7: Rekonstruktion, Grundriss 2.Obergeschoss, in Anlehnung an [Sch 04/1]

Zur Ausstattung des Kapellenraumes gehörte möglicherweise auch eine bewegliche Vorschubdecke, mit der die Kapelle von dem Kirchenschiff getrennt werden konnte. Während musikalischer Vorführungen blieb diese geöffnet, konnte aber bei Musikproben geschlossen werden [Jun 85, S.33]. Die bewegliche Deckenkonstruktion wird allerdings nur von Jung erwähnt. In Entwurfs- und Ausführungsplänen oder Zeichnungen des Innenraumes ist sie nicht zu erkennen. Da sie angeblich bei den Musikvorführungen ohnehin geöffnet war, bleibt sie bei der akustischen Untersuchung unberücksichtigt. Jung berichtet ferner über den Zustand der Musikerempore: “Mit der Kapelle und Kuppel gab es aufgrund der baulichen Situation bald manche Schwierigkeiten, und ob die objektiven Voraussetzungen wie Licht, Platzbedarf und die akustischen Verhältnisse für das Musizieren aus dieser Höhe günstig waren, muß bezweifelt werden.“ [Jun 85, S.33]. Die baulichen oder raumakustischen Mängel müssen gravierend gewesen sein, da sie auch von Johann Sebastian Bach beanstandet wurden [Jun 85, S.33]. In dem Zeitraum zwischen 1711 und 1713 sollen nach Jung Reparatur- und Umbauarbeiten an dem Kapellenraum durchgeführt worden sein. Die Horizontaldecke erhielt in diesem Zusammenhang eine neue Bemalung und die Kuppel eine Kupferdeckung. Jung geht aber nicht darauf ein, was aus baulicher sowie aus raumakustischer Sicht genau geändert wurde und in anderen Quellen werden diese Umbauarbeiten überhaupt nicht erwähnt. Auf dem Gemälde der Abb. 3.9, das etwa um 1730 entstand, ist die Kuppel der

“Capella“ beispielsweise mit demselben Material eingedeckt wie die restlichen Dachflächen des Kirchenbaus, die nachweislich eine Schieferdeckung besaßen [Sch 04/1, S.32]. Für die akustische Rekonstruktion wird aus diesem Grund der Zustand von 1658 angesetzt.

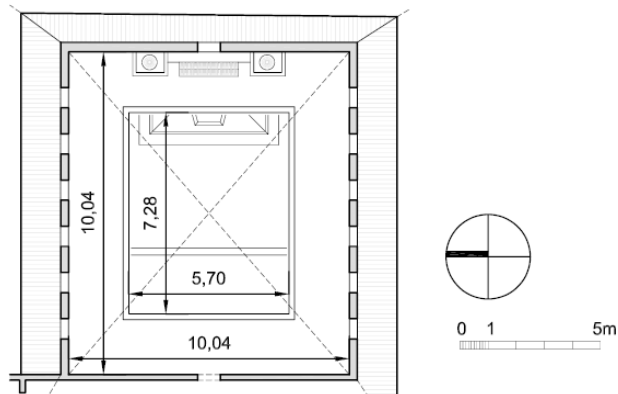


Abb. 3.8: Rekonstruktion, Ausschnitt aus dem Grundriss des Dachgeschosses, in Anlehnung an [Sch 04/1]

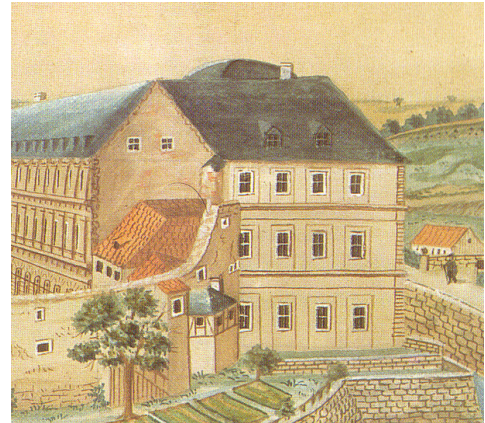


Abb. 3.9: Schlosskapelle der “Wilhelmsburg“, Aquarell, unbekannt, um 1730, [Sch 04/1, S.9]

3.1.3 Schnitte

Für die Rekonstruktion der Aufrisse stand eine Wandansicht der Eingangsseite zur Verfügung, die vermutlich auf Bonalino zurückgeht [Bot 00, S.18], sowie ein von Richter angefertigter Längsschnitt mit Blick Richtung Süden (Abb. 3.10). Die symmetrischen Vorstellungen Bonalinos sind auch im Aufriss und der Wandgliederung deutlich zu erkennen. Pilaster und Pfeiler sind in einem einheitlichen Raster angeordnet. Die Gewölbebögen der Emporenarkaden wurden in den Aufbau der Wandflächen übernommen.

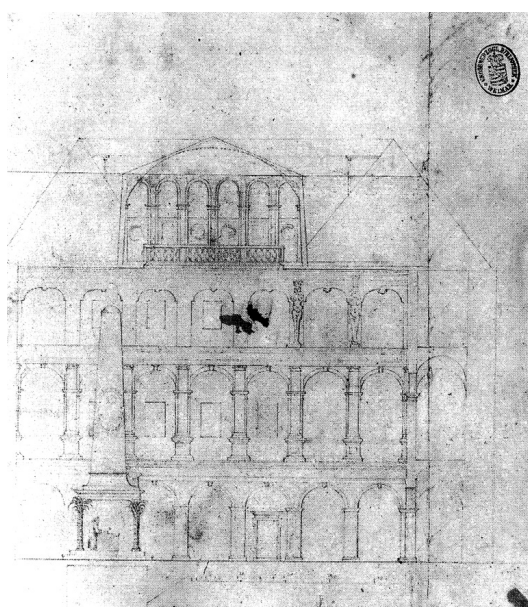


Abb. 3.10: Johann Moritz Richter, Längsschnitt durch die Schlosskirche nach Süden, Bleistift, um 1655, [Bot 00, S.118]

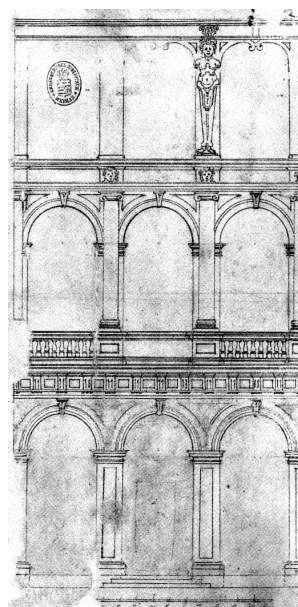


Abb. 3.11: Giovanni Bonalino, Wandaufriß der Schlosskirche, Feder über Bleistift, um 1620, [Bot 00, S.17]

Die horizontale Gliederung der Geschosse wurde differenziert ausgeführt (Abb. 3.11). Bonalino vereinte in der Ausführung der Pfeiler und Pilaster die Säulenordnung der drei Hauptstile griechischer Architektur in einer zeitlichen Ordnung vom Erdgeschoss zum zweiten Obergeschoss (dorisch, ionisch, korinthisch mit Herme) [Bot 00, S.18]. Die Strukturierung der Pilasteroberfläche nahm damit in jedem Geschoss zu, was sich auf die Stärke der diffusen Schallrückwürfe auswirkte. Als Geländer für die Emporen verwendete Bonalino eine Brüstung aus Mauerwerk, verziert mit gotisch angelehnten Maßwerk [Sch 04/1, S.10], deren Oberkante in Gesimsen auf den Wandflächen fortgeführt wurde. Die einzelnen Geschosse sind im Kirchenschiff durch umlaufende Kranzgesimse hervorgehoben, die Chorbereich und Langhaus in einem einheitlichen Raum zusammenfassten und den klaren horizontalen Aufbau unterstrichen.

Das Gemälde zeigt einen Blick von der Empore im ersten Obergeschoss zentral in das Kirchenschiff. Einige enthaltenen Details sind jedoch nicht eindeutig nachweisbar. Beispielsweise ist die Größe des Ziegelpflasters zweifelhaft. In der Pfarrkirche von Tiefurt sind Ziegelplatten mit einem identischen Verlegemuster vorhanden, die allerdings andere Proportionen aufweisen. Zu erkennen ist die optische Trennung zwischen Chorbereich und Langhaus, die Richter durch die Verwendung eines schwarz-weiß karierten Natursteinbodens im Chor verstärkt.



Abb. 3.14: Christian Richter, Schlosskirche in Weimar, Öl / Leinwand, um 1660, [Jun 85, S.22]

Durch den zentralen Blickwinkel wird die Symmetrie des Raumes stark betont, aber auch die Axialität des Raumes zeigt sich in diesem Gemälde. Der Blick wird von den raumverbreitenden Emporen aus auf den voluminösen Kanzelaltar gelenkt. Durch ihre Größe dominiert die Kanzel den Raum und lenkt die Blicke durch den sich nach oben verjüngenden Obelisken weiter in Richtung der Deckenöffnung, die sich zentral über dem Kirchenschiff befindet und die Sicht auf die Orgel freigibt. In der Schlosskapelle wird dieser Effekt durch die natürliche Belichtungssituation verstärkt worden sein. Der mittig in den Baukörper integrierte Zentralbau wurde nur über die Schmalseiten direkt mit Tageslicht versorgt. Durch die Nachbarräume der Obergeschosse und die “Capella“ gelang zusätzlich nur mattes, diffuses Licht in das Kirchenschiff. Beachtet man

die große Raumtiefe der Schlosskapelle von ca. 25 Metern, muss sie ohne zusätzliche Beleuchtung eher düster und dunkel gewirkt haben (Abb. 3.15, Abb. 3.16).

Fensterflächen weisen eine ausgesprochene Tiefenabsorption auf [Mey 03, S.163]. Bei dem vorhandenen geringen Fensterflächenanteil an der Gesamtoberfläche des Raumes konnte der Schall im tiefen Frequenzbereich allein durch die Fenster nicht so stark gedämpft werden, als wenn die Längswände ebenfalls mit großen Fenstern ausgestattet gewesen wären. Ein damit verbundener, in tiefen Tonlagen stärker betonter Klangeindruck hätte somit dem gedämpften Licht auch akustisch entsprochen [Mey 03, S.154].



Abb. 3.15: Blick seitlich von der Empore im ersten Obergeschoss, virtuelles Bild, [sch 05]



Abb. 3.16: Blick von der Chorschranke Richtung Eingang, virtuelles Bild, [sch 05]

Die Musikerempore war mit zahlreichen runden Fenstern ausgestattet. Doch werden die Schnitte in der Abb. 3.12 und Abb. 3.13 betrachtet, fallen die den Dachpavillon umschließenden Dachflächen auf. Über diese konnte nur bei hohem Sonnenstand direktes Licht einfallen. Im frühen und späten Tagesverlauf war nur schwaches Licht vorhanden, was sich auch auf die Eignung zum Musizieren ausgewirkt haben muss. Einen Eindruck des Kapellenraums bieten die Abb. 3.17 und Abb. 3.18. Der Blick nach unten in das Kirchenschiff zeigt, dass der Kanzelaltar zusammen mit der dahinter liegenden Altarempore nachträglich eingebaut wurde. Die Empore gliederte sich aus architektonischer Sicht nicht harmonisch in das Gesamtkonzept des Kirchenraumes ein. Da sie ausschließlich auf die Höhe des Altares angepasst ist, schneidet sie die Fensternischen in Höhe der Rundbögen.

Der Kanzelaltar wird in mehreren Quellen erwähnt. Das Gemälde von Christian Richter ist aber die einzig vorhandene Bildquelle (Abb. 3.14), die einen Aufschluss über das äußere Erscheinungsbild liefert. Dieses zeigt den Altar ausschließlich frontal, der im Vergleich zum Tiefurter Kanzelaltar eher schlicht verziert wurde. Für die akustische Rekonstruktion wird von einfachen Schnitzereien und Bildnissen an der Frontseite ausgegangen, während die restlichen Seiten schmucklos gehalten sind.



Abb. 3.17: Blick von der “Capella“ Richtung Kanzelaltar, virtuelles Bild, [sch 05]

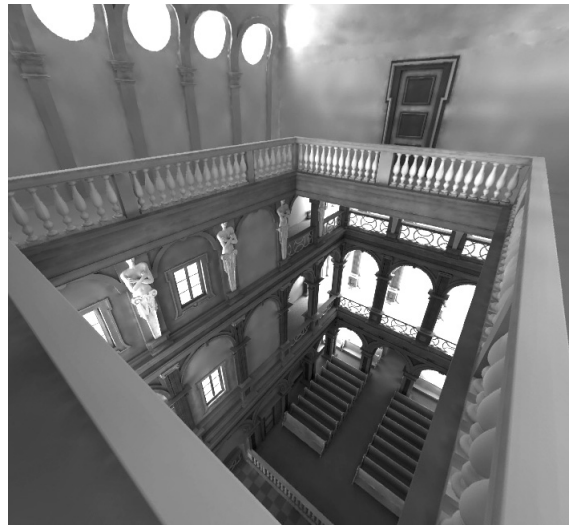


Abb. 3.18: Blick von der “Capella“ Richtung Langhaus, virtuelles Bild, [sch 05]

3.2 Material und konstruktiver Aufbau

Das Material der Innenraumbooberflächen sowie der Aufbau von Wand- und Deckenkonstruktionen beeinflusst die akustische Situation eines Raumes maßgeblich. Die Eigenschaften der Materialien und deren Verarbeitung bestimmen die Größe der Schallabsorption bei seiner Ausbreitung sowie die Art und Weise, wie er von den Raumbegrenzungsflächen zurückgeworfen wird. In den historischen Plänen und Zeichnungen wurden keine Angaben über verwendete Materialien vermerkt oder die konstruktive Durchbildung baulicher Elemente beschrieben. Die einzige historische Quelle, aus der sich Rückschlüsse auf verwendete Materialien schließen lassen, ist das Gemälde von Richter (Abb. 3.14). Um eine Anwendung der aus dem Bild abgeleiteten Materialien zu bekräftigen, werden vorhandene Vergleichsobjekten näher untersucht. Dafür diente erneut das Schloss Neu-Augustusburg in Weißenfels, Schloss Friedenstein in Gotha und die Pfarrkirche in Tiefurt.

Bei der Suche nach möglichen Materialien ist eine Recherche zu traditionellen Bauweisen, in der Entstehungszeit zur Verfügung stehenden Baustoffen und dem damaligen Stand der Technik durchgeführt worden. Besonders in Gesprächen mit Baudenkmalpflegern [wir 05] konnten weitere Erkenntnisse gewonnen werden. Der Rekonstrukteur Werner [wer 04], der ein Konzept zur Restaurierung des Schallhauses auf der Heidecksburg in Rudolstadt erarbeitet hat, gab eine mögliche Konstruktion der Musikerkapelle an. Das Schallhaus entstand bei dem Bau des barocken Schlossgartens. Es besitzt eine ähnlich geformte Überdachung wie die Musikerempore der “Himmelsburg“ und diente ebenfalls für musikalische Darbietungen, womit eine Verwendung des Schallhauses als Vergleichsobjekt ausreichend begründet ist.

3.2.1 Wandflächen

Die Wände aller Geschosse bestanden aus einem Kalkbruchsteinmauerwerk, einschließlich der Pfeiler und Pilaster. Hervorspringende Kapitelle, Gesimskränze oder ähnlich große Strukturen wurden vermutlich aus gebrannten Ziegeln herausgemauert. Für die Oberfläche der Innenwände kamen zwei Materialien zur Anwendung. Ebene Wandflächen waren mit einem feinkörnigen Kalkputz mit glatter Oberflächenstruktur versehen. Feinstrukturierte Elemente, das betrifft die Oberfläche der Pfeiler und Wandpfeiler, der Gesimsbänder und Rundbögen sowie der Hermenpilaster, wurden aus Gips gefertigt [wir 05]. Die Brüstungen der Emporen bestanden aus Mauerwerk, das kirchenschiffseitig mit einem aus Gips bestehendem Maßwerk verziert wurde.

3.2.2 Fußböden

Im westlichen Teil der Kirche, im Langhaus, war nach dem Gemälde von Richter im Erdgeschoss ein steinerner Fußboden aus gebrannten Ziegel verlegt [wir 05]. Für die akustische Rekonstruktion werden die Ziegelplatten der Tiefurter Dorfkirche (Abb. 3.19) als Materialgrundlage herangezogen, da sie bis auf die Proportionen identisch mit diesem Pflaster sind.



Abb. 3.19: Fußbodenaufbau Langhaus, v.l.: Pfarrkirche Tiefurt, Gemälde nach Richter

Bei dem Umbau der Schlosskirche 1658 ordnete Richter im Chorbereich ein anderes Bodenmaterial an. Er verwendete nach dem Richterschen Gemälde schwarze und weiße Natursteinplatten, die schachbrettartig verlegt wurden. In der Schlosskapelle des Weißenfelser Schlosses Neu-Augustusburg, an deren Bau Richter nur kurz nach dem Umbau der Weimarer Kapelle beteiligt gewesen war, ist ebenfalls ein solcher Fußbodenaufbau vorhanden (Abb. 3.20). Er dient als Grundlage für die akustischen Berechnungen.



Abb. 3.20: Fußbodenaufbau Chorbereich, v.l.: Schlosskirche Weißenfels, Gemälde nach Richter

Die Unterfüllung bestand traditionell aus einer verdichteten Sand-Schutt-Mischung, auf der das Pflaster und die Steinplatten in einem schwimmenden Gipsestrich verlegt wurden. Als Fugenmaterial bevorzugte man einen Kalkmörtel. Als Johann Sebastian Bach seine Stellung am Weimarer Hof bekam, existierten die Fußböden bereits 49 bzw. 77 Jahre. Aus diesem Grund wird von einem ähnlich abgenutzten Zustand der Oberflächen ausgegangen, wie er heute in Tiefurt und Weißenfels anzutreffen ist (Abb. 3.19 und Abb. 3.20).

3.2.3 Emporen und Gewölbe

Die Emporen bildeten einen horizontalen Raumabschluss in Form eines aus Naturstein gemauerten Kreuzgewölbes [wir 05], dessen Grade auf den Pfeilern und Pilastern lagerten (Abb. 3.21). Die Gewölbeflächen wurden mit einem glatten Gipsputz versehen und besaßen unter Umständen auch einen Farbanstrich.



Abb. 3.21: Kreuzgradgewölbe unter den Emporen, virtuelles Bild [sch 05]

Den Fußboden der Empore bildete eine Holzbalkendecke mit einfacher Holzdielung [wir 05]. Diese trug ihre Last nicht über das Gewölbe ab, sondern lagerte auf der Außenwand und der von den Pfeilern getragenen Innenwand. (Abb. 3.22). Der von Gewölbe und Holzbalkendecke eingeschlossene Zwischenraum ist möglicherweise mit einem losen Schüttgut verfüllt worden, wobei ein gewisser Hohlraum zur Decke nicht ausgeschlossen werden kann [wir 05]. Zu Bachs Schaffenszeit in Weimar wird die Dielung rau und rissig gewesen sein, wenn davon ausgegangen wird, dass sie in den über siebenzig Jahren nicht ausgewechselt wurde [wir 05].

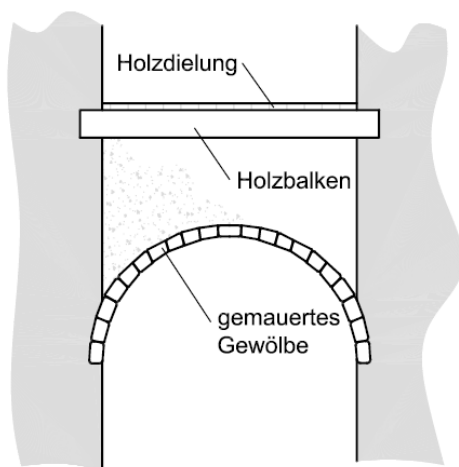


Abb. 3.22: Konstruktive Ausbildung der Gewölbe

3.2.4 Decke

Die einfache Flachdecke als oberer Raumabschluss des Kirchenschiffs wurde in Form einer Holzbalkendecke ausgeführt. Der angegebene, konstruktive Aufbau der Decke (Abb. 3.23) ist an vorhandene Decken historischer Gebäude ähnlicher Entstehungszeit und gleichen Gebäudecharakters angelehnt. Für die Dielung, das betrifft in diesem Fall den Fußboden der Musikerempore, war es üblich sehr starke und breite Bretter bzw. Bohlen zu verwenden, die in der "Himmelsburg" vermutlich auch einen Farbanstrich besaßen. Der Balkenabstand kann mit ca. 80 cm angenommen werden, zwischen denen eine Verwendung von Lehmwickeln wahrscheinlich ist [wir 05]. Dafür mussten die Balken mittig auf der gesamten Längsseite eingekerbt werden. In diese Kerben wurden anschließend mit Stroh oder einem Lehm-Stroh-Gemisch umwickelte Knüppel zwischen die Balken geklemmt und ein gewisser Grad an Dämmwirkung erzielt [wir 05]. Zwischen Dielung und Wickel entstand ein Hohlraum, so dass der Fußboden besonders im tiefen Frequenzbereich schallabsorbierend wirkte.

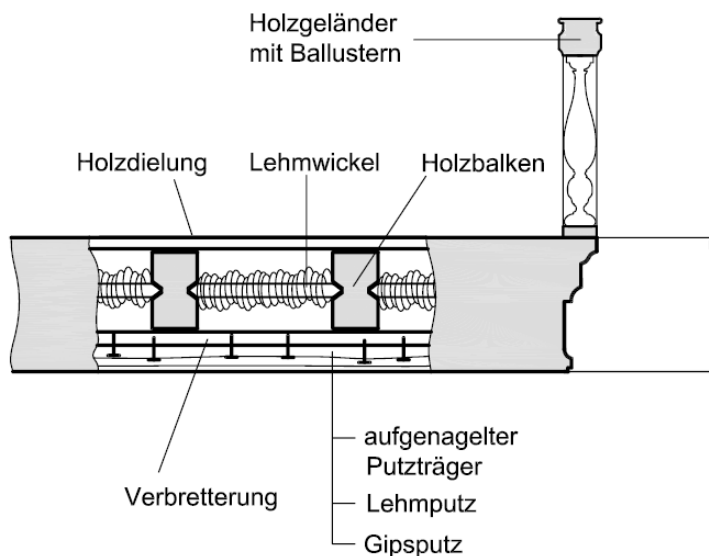


Abb. 3.23: Konstruktive Ausbildung der Decke über dem Kirchenschiff

Die Unterseite der Balken wurde in einem unregelmäßigen Abstand mit Brettern verschlagen, auf die ein Putzträger (Gewebe) aufgebracht werden konnte. Der darauf aufgetragene grobe Lehmputz wurde mit einem dünnen Gipsputz geglättet. Dieser ist möglicherweise gestrichen oder bemalt worden. Die Stirnseiten der Deckenöffnung wurden mit Holzverzierungen verkleidet.

3.2.5 Dachkuppel der Musikerempore

Der Dachpavillon über der Deckenöffnung wird von Richter ausschließlich aus Holz aufgestellt worden sein. Massivholzprofile für Stützen, Träger und Binder bildeten das Traggerüst für Wände und Dach. Auf der Außenseite wurde das Holzgerüst mit einer Brettschalung verschlossen und mit Schiefer eingedeckt. Auf die innere Schalung ist ein Putzträger aus Rohrmatten oder Gewebe aufgebracht worden, um einen ausreichenden Verbund zwischen Schalung und Lehmputz herzustellen [wer 04]. Zur Glättung kam auf den Lehm ein dünner Gipsputz, der nach dem Gemälde von Richter (Abb. 3.14) zumindest im Kuppelbereich mit einem Deckengemälde verziert wurde.

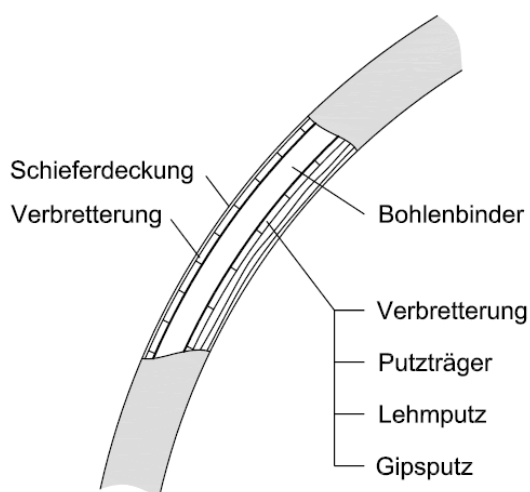


Abb. 3.24: Angenommene Konstruktion der Kuppel des Kapellenraumes, nach [wer 04]

Die Abb. 3.25 vermittelt eine Vorstellung vom damaligen Zustand der Musikerempore. Die Proportionen der Orgel stimmen im Vergleich mit anderen Zeichnungen gut überein (Abb. 3.14). Als wahrheitsgetreue Wiedergabe eines von Bach gegebenen Konzertes kann die Zeichnung jedoch nicht angesehen werden. Es handelt sich eher um die Illustration eines Stimmungseindrucks. Nach dem Weidnerschen Aufmaß war zwischen Wand und Geländer nur ein geringer Abstand von weniger als zwei Metern vorhanden. Stark besetzte Konzerte, so wie es die Abbildung vermittelt, konnten von der „Capella“ aus nicht gegeben werden. Gut zu erkennen sind die Pilaster der Wandflächen. Im Gegensatz zum Kirchenschiff bestanden diese in der „Capella“ aus Massivholzprofilen mit einer herausgearbeiteten Oberflächenstruktur. Bei einer Betrachtung der gesamten Konstruktion des Dachpavillons unter akustischen Gesichtspunkten fällt der Hohlraum zwischen Außen- und Innenschalung besonders ins Gewicht. Wand- und Dachflächen waren schwingungsfähige Elemente, die eine große Absorption des Schalls im tiefen Frequenzbereich bewirkt haben müssen.



Abb. 3.25: Bach gibt ein Konzert in der “Capella“, 1714, [Sch 04/1, S.10]

3.2.6 Fenster und Türen

Die Fenster in den Außenwänden und zu den benachbarten Zimmern besaßen, wie zu dieser Zeit üblich, eine Einfachverglasung. Wahrscheinlich sind in einer schlichten Holzfassung Butzenscheiben verwendet worden. Die Tür- und Fensterrahmen aus Holz waren mit barocken “Ohren“ an den oberen Ecken aufwendig verziert [Sch 04/1, S.36]. Über den Holztüren waren in Höhe der Pilasterkapitelle breite Gesimsbänder angebracht (Abb. 3.26).

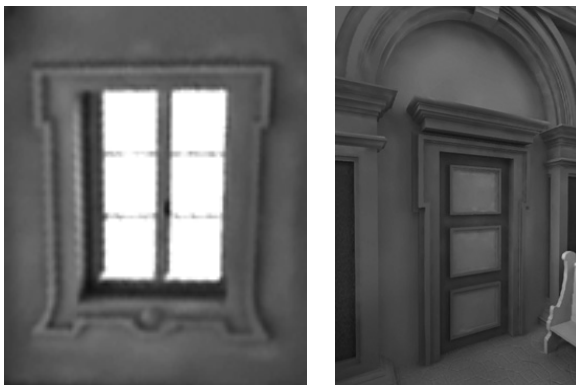


Abb. 3.26: Fenster zu benachbartem Raum, Tür zum Treppenhaus im Erdgeschoss, virtuelle Bilder [sch 05]

Die Blendtür gegenüber dem Treppenhauszugang im Erdgeschoss wurde als vollständige Tür ausgeführt, die vermutlich auch die Möglichkeit zum Öffnen besaß. Dahinter befand sich jedoch kein nutzbarer Raum. Die Rahmen der Scheinfenster im ersten Obergeschoss werden sich nicht von den übrigen Fensterrahmen unterscheiden haben. Das Vorhandensein des Fensterglases wurde dagegen durch ein auf die Putzfläche aufgemaltes Fenster vorgetäuscht [wir 05]. Die starke Strukturierung der Fenster- und Türelemente sorgte für eine hohes Maß an Diffusität.

3.2.7 Einrichtungsgegenstände

Die erste Orgel der Kapelle ließ 1657/58 Herzog Wilhelm IV. im Zuge der Umgestaltung der Schlosskapelle von dem Orgelbauer Ludwig Compenius in Erfurt herstellen. Das Instrument war von Anfang an in dem Orgelraum über der Deckenöffnung untergebracht. Noch bevor Bach als Hoforganist in Weimar angestellt wurde, ist die Orgel von Johann Conrad-Weishaupt umgebaut worden. Die Kostenaufstellung zu Grunde legend, handelte es sich dabei um einen beträchtlichen Umbau. “Die Disposition des Instruments, das heißt der Aufbau der einzelnen Register und Stimmen, ist nicht bekannt.“ [Jun 85, S.34].

In dieser Form wird die Orgel aber für den damals schon als virtuoser Orgelspieler bekannten Bach künstlerisch unbefriedigend gewesen sein. Denn mit der Umgestaltung der Kapelle 1711 ist auch die Orgel vollständig neu überarbeitet worden. Möglicherweise hat Bach selbst dafür die Disposition geschrieben. Von Heinrich Nicolaus Trebs wurde die gesamte Orgel überarbeitet und verschiedene neue Register angefertigt. Im Jahr 1714 konnte sie aufgestellt und gestimmt werden [Jun 85, S.34]. Damit hatte Bach kurz nach Beginn seiner neuen Funktion als Konzertmeister ein fast neues Instrument zur Verfügung.



Abb. 3.27: Sicht auf die Orgel in der “Capella”, virtuelles Bild, [sch 05]

Die Orgel als Gegenstand des Kapellenraumes ist auch für die raumakustische Untersuchung von Bedeutung. Ihre Prospektfläche wirkte als ein breitbandiger Schallabsorber. Dieser Effekt sollte bei der Simulation nicht vernachlässigt werden. Von der Orgel, wie sie Johann Sebastian Bach zur Verfügung stand, lag dieser Arbeit keine bildliche Quelle oder textliche Beschreibung zur Verfügung. Die Abbildung der Orgel auf dem Gemälde von Richter zeigt das unter Herzog Wilhelm IV. eingebaute Instrument, da das Bild noch vor dem Orgelumbau entstand. Die Darstellung aus der Abb. 3.25 ist identisch mit diesem Instrument und hat sich vermutlich an dem

Richterschen Gemälde orientiert. Für die Simulation sind lediglich der Standort und die groben Abmaße des Instrumentes relevant. Auf Grund des begrenzten Raumes in der “Capella“ wird die Orgel bei den Umbauten des Kapellenraumes in ihrer Größe nicht verändert worden sein. Die erste fest in der Kirche eingebaute Orgel, wie sie in der Abb. 3.27 zu sehen ist, kann demnach ohne Bedenken als Grundlage für die Berechnung verwendet werden.

Über das Gestühl in der “Himmelsburg“ kann keine gesicherte Aussage getroffen werden. In der einzigen Bildquelle des Innenraumes, dem Gemälde von Richter (Abb. 3.14), sind keine Bänke oder Stühle vorhanden. Die Möglichkeit, dass die Bestuhlung bei Bedarf verstaut werden konnte, bestand nicht, da die benachbarten Räume zu klein oder für eine andere Nutzung ausgelegt waren [wir 05]. In Anbetracht der liturgischen Forderungen der reformierten Kirche und der Ausstattung anderer Schlosskapellen dieser Zeit, kann davon ausgegangen werden, dass auf jeden Fall eine Bestuhlung vorhanden gewesen ist (Kap. 2.4.2, S. 36, Abs. 2). Ausgangspunkt für die Wahl eines gebräuchlichen Kirchengestühles für die Rekonstruktion stellen die Schlosskapellen von Schloss Neu-Augustusburg in Weißenfels und Schloss Friedenstein in Gotha dar. In Beiden sind einfache Holzbänke mit einer hohen Rückenlehne fest eingebaut. Heute sind die Bänke mit Polsterauflagen ausgestattet, die zu Bachs Lebenszeit aber sicherlich nicht gebräuchlich waren (Abb. 3.28).

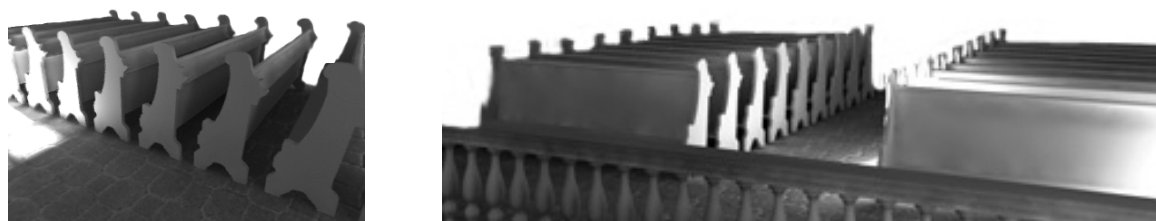


Abb. 3.28: Für die raumakustische Simulation angenommenes Kirchengestühl, virtuelles Bild, [sch 05]

Für die Rekonstruktion der “Himmelsburg“ werden 3 Meter breite Kirchenbänke angenommen, die in einem Abstand von 95 Zentimetern im Langhaus aufgestellt waren (Abb. 3.29). Das im Erdgeschoss unter den Emporen ein Gestühl vorhanden war, ist ebenfalls denkbar, wurde aber bei der raumakustischen Simulation nicht berücksichtigt. Auf den Emporen der beiden Obergeschosse, die dem Hofstand und der herzoglichen Familie vorbehalten waren, wird nicht von Bänken, sondern von einzelnen Stühlen ausgegangen, wie sie auch in der Abb. 3.25 dargestellt sind. Diese weisen eine andere Absorption auf als durchgehende Kirchenbänke. Da das Vorhandensein eines festen Kirchengestühles nicht eindeutig nachweisbar ist, werden bei der Ermittlung der raumakustischen Parameter drei verschiedene Zustände berechnet: ohne Gestühl im Kirchenraum sowie mit Gestühl, aber ohne Personen und im vollbesetzten Zustand.



Abb. 3.29: Bestuhlung der Schlosskapellen, v.l.: in Weißenfels und in Gotha, [sch 04/1]

Die Konstruktion der nachträglich eingebauten Altarempore, die hinter dem Kanzelaltar der Schlosskapelle (Abb. 3.31) die gesamte Raumbreite einnahm, ähnelte einer Holzbalkendecke. Auf der östlichen Außenwand, den seitlichen Innenwänden und in Richtung der Kanzel auf zwei Vollholzstützen lagerte das Holzgerüst, auf das die Dielen aufgebracht waren. An der Frontseite war ein Holzgeländer mit Ballustern vorhanden, wie es Richter auch auf der Musikerempore und zur Trennung zwischen Chor und Langhaus verwendete (Abb. 3.14).



Der Altar in der Schlosskapelle stand leicht erhöht im Zentrum des Chorbereiches direkt über der herzoglichen Gruft. Die zwei Stufen des Sockels und der Altar selbst waren aus Sandstein gefertigt. Über dem Altar war die Kanzel als Baldachin aufgestellt. Sie wurde von zu Palmen umgebildeten Stützen getragen, die an das Allerheiligste des Jerusalemer Tempels Salomons erinnern sollten [Bot 00, S.24].

Abb. 3.30: Palmensäule des Tiefurter Kanzelaltares, [sch 04/1, S.21]



Der Kanzelaltar der Tiefurter Pfarrkirche (Abb. 3.4) weist markante Gemeinsamkeiten mit dem Richterschen Gemälde auf (Abb. 3.14), weshalb er für die akustische Rekonstruktion als Vorlage dient. Die palmenartigen Stützen waren aus Vollholzprofilen gefertigt (Abb. 3.30) und trugen den pyramidalen Aufsatz. Ein auf der Oberseite verschaltes Holzgerüst bildete den Baldachin. Der große, obeliskenförmige Aufbau wurde von einer massiven Holzkonstruktion getragen, die auf allen Seiten mit einer Holzverschalung geschlossen wurde. Die Schalung ist vermutlich sehr akkurat ohne sichtbare Stoßstellen ausgeführt worden, so dass eine eben, glatte Oberfläche entstand [wir 05]. Im Unterschied zur Tiefurter Kanzel war der Aufbau in der “Himmelsburg“ nur dezent geschmückt. Einfache Schnitzereien auf der Front- und den Seitenflächen haben für diffuse Schallrückwürfe gesorgt, während an der Rückseite vermutlich keine Verzierungen vorhanden waren. Bis auf die Öffnung, durch die der Geistliche von der Altarempore auf die Kanzel gelangen konnte, handelte es sich bei dem Aufsatz um einen Hohlkörper. Auf Grund seines großen Volumens, das der Altar im Raum einnahm, wird er als ausgesprochener Tiefenabsorber wirksam gewesen sein.

Abb. 3.31: Säulenträger Pyramidenkanzaltar der “Himmelsburg“, virtuelles Bild, [sch 05]

4 Raumakustische Simulation

Die akustische Qualität eines Raumes kann durch verschiedene Kriterien in Bezug zu seiner jeweiligen Nutzungsart eingeordnet werden. Diese Bewertungskriterien lassen sich alle aus den messtechnisch aufnehmbaren Schallfeldparametern ableiten sowie durch computergestützte Simulationsverfahren ermitteln. Durch welche objektiven Kriterien zugeordnete subjektive Eindrücke der Klangempfindung numerisch beschrieben werden können, wird zu Beginn des Kapitells erläutert. Für eine Einordnung der Bewertungskriterien hinsichtlich der speziellen Atmosphäre eines sakralen Raumes sind jedoch nur wenige Untersuchungsergebnisse vorhanden, zumal die Nutzungsansprüche an den Kirchenraum – und damit die Anforderungen an die Akustik – teilweise extrem differieren. Aus diesem Grund werden im Folgenden die Bereiche der erforderlichen Kriterien, die eine positiv empfundene Akustik beschreiben, speziell für Kirchen eingegrenzt.

Die raumakustischen Kriterien der “Himmelsburg“ konnten aus simulierten Schallfeldgrößen abgeleitet werden. Die Arbeitsweise des verwendeten Simulationsprogramms und die erforderlichen Eingabeparameter werden in diesem Kapitel näher betrachtet. Dabei wird speziell auf Problematiken eingegangen, die sich aus der geometrischen Struktur der Schlosskapelle ergeben. Durch die Ankopplung der Musikerkapelle an den Kirchenraum über eine Öffnung in der Decke, sowie infolge verdeckter Raumbereiche hinter den Pfeilern, werden wesentliche Welleneigenschaften des Schalls durch das Simulationsprogramm nicht berücksichtigt. Um den Einfluss des angewendeten Simulationsverfahrens auf die Bewertungskriterien einzuschätzen, sind die Schallfeldparameter eines Referenzobjektes – mit ähnlich akustischen Eigenschaften wie der Schlosskapelle in der “Wilhelmsburg“ – messtechnisch aufgenommen worden. Durch eine anschließende Simulation des Referenzobjektes wird die Simulationsgenauigkeit des verwendeten Programms abgeschätzt. Des weiteren sind die Eingabeparameter – speziell die absorbierenden Eigenschaften der Raumbooberflächen – mit Unsicherheiten behaftet, deren Einfluss auf die simulierten Bewertungskriterien in diesem Zusammenhang ebenfalls untersucht wird.

4.1 Raumakustische Bewertungskriterien

Die Akustik eines Raumes ist im wesentlichen von dessen räumlicher Gestaltung abhängig. Dabei spielt die “Primärstruktur“ (Volumen, Raumproportionen, Formen im Grund- und Aufriss) eine erhebliche Rolle, aber auch die “Sekundärstruktur“ (Materialien, Ausbildung der Raumbegrenzungsflächen, Oberflächengestaltung, Einbauten, Inventar) hat einen bedeutenden Einfluss auf die akustische Qualität. Die von der räumlichen Situation abhängigen Parameter sind durch verschiedene Kriterien erfassbar. Die Wirkung des Direktschalls und der früh eintreffenden Reflexionen sowie die Art des Nachhalls können objektiv ermittelt und damit auch bewertet werden.

Wie die akustische Qualität hingegen von einem Hörer eingeschätzt wird, hängt zusätzlich von vielen subjektiven, individuell unterschiedlichen Einflüssen ab. Neben den Hörgewohnheiten sowie der emotionalen und psychologischen Verfassung des Hörers spielt auch die Erwartungshaltung beim Betreten eines Raumes eine wesentliche Rolle, d.h. stimmt die Akustik mit dem visuellen Eindruck überein. Ein großer Raum suggeriert beispielsweise allein durch seine optische Wirkung einen langen Nachhall. Ist dieser aber nicht vorhanden, wird die akustische Qualität oft bemängelt. Besonders bei Musik ist die Beurteilung raumakustischer Eigenschaften stark von subjektiven emotionalen Faktoren abhängig, so dass differenzierte Bewertungen zustande kommen können [Fas 98, S.133]. Aus diesem Grund wurden für die Beurteilung der raumakustischen Qualität subjektive Bewertungskriterien formuliert und Zusammenhänge zu Schallfeldparametern hergestellt. Für diese objektiven Kriterien, die sich messtechnisch aufnehmen oder rechnerisch ermitteln lassen, können funktionsbezogene Optimalwerte angegeben werden.

Im Gegensatz zum freien Schallfeld, bei dem sich der Schall ungehindert nach allen Seiten hin ausbreiten kann, wird der Schall in einem Raum an Wänden, Decken und Einbauten reflektiert und im Volumen zusammengehalten [Vor 89, S.7]. Infolge der Reflexionserscheinungen wird der Direktschall einer Schallquelle verstärkt und es bildet sich ein diffuses Schallfeld aus, d.h. die Reflexionen treffen in einer immer dichter werdenden Zeitfolge an dem Ort eines Zuhörers ein [Mey 04, S.28]. Nach Beenden eines Schallereignisses fällt der Pegel allmählich ab, was als Halligkeit empfunden wird und die auffälligste und bekannteste akustische Eigenschaft eines Raumes ist. Da die Steilheit des Abfalls ausschließlich von den Raumeigenschaften abhängig ist, kann daraus eine objektive Größe abgeleitet werden – die Nachhallzeit. Allerdings handelt es sich dabei um eine statistische Größe, die bei einfacher Raumgeometrie weitestgehend unabhängig vom Hörerplatz ist. Für die Beurteilung unterschiedlicher Platzbereiche stehen weitere Kriterien zur Verfügung, die sich aus der zeitlichen und räumlichen Verteilung der am Hörerplatz eintreffenden Schallenergie ergeben. Sie werden deshalb unter dem Begriff Energiekriterien zusammengefasst.

Für die Beurteilung der subjektiven Merkmale der akustischen Beschaffenheit eines Raumes stehen 5 Gruppen von objektiven Messgrößen zur Verfügung. Jede Gruppe beinhaltet mehrere Größen, die meist stark miteinander korrelieren, weshalb es oft nicht nötig ist, für eine Beurteilung alle Messgrößen heranzuziehen. Allerdings sollte aus jeder Gruppe zumindest eine Messgröße verwendet werden. Die für die Bewertung der akustischen Situation der "Himmelsburg" verwendeten Kriterien sind in der Abb. 4.1 zusammengestellt und werden im Folgenden näher erläutert.

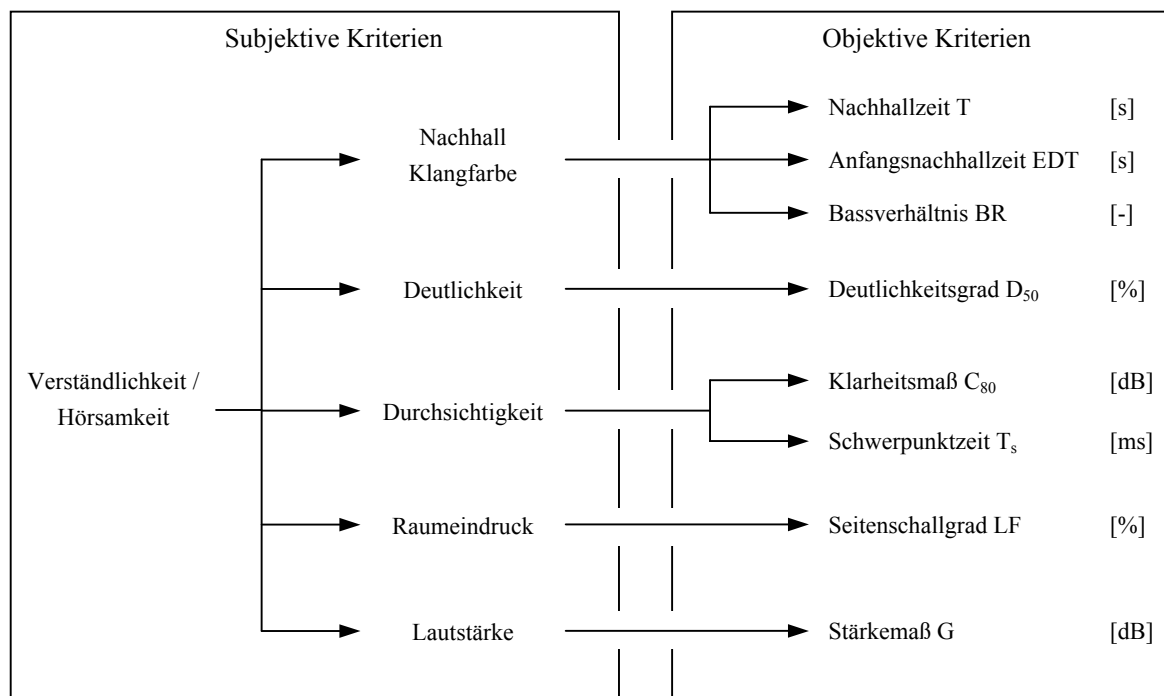


Abb. 4.1: Subjektive und objektive Bewertungskriterien

4.1.1 Nachhall und Klangfarbe

Das Schallfeld in nahezu allen historischen Kirchen ist durch ein hohes Maß diffuser Schallrückwürfe geprägt. Die Nachhallzeit als statistische Kenngröße stellt damit, einschließlich ihrer Frequenzcharakteristik, eine wichtige Größe zur Beschreibung der akustischen Verhältnisse dar [Mey 04, S.94]. Die subjektiv empfundene Dauer des Nachhalls ist durch die Zeitspanne zwischen dem Beenden eines Schallereignisses und dem Erreichen des Grundgeräuschpegels charakterisiert. Für eine objektive Bewertung dieser Halligkeit eines Raumes wurde die Nachhallzeit T (Reverberation Time – RT) als diejenige Zeit definiert, in welcher der Schalldruckpegel (siehe E.1.1 “Schallfeldparameter“) nach Beenden eines Schallereignisses gegenüber eines Anfangswertes um 60 dB gesunken ist. Mathematisch lässt sich dieser Pegelabfall bei einer Schallgeschwindigkeit in Luft von $c = 340$ m/s folgendermaßen ausdrücken [Arn 04, S.39]:

$$T = 0,163 \cdot \frac{V}{A_{\text{ges}}} = 0,163 \cdot \frac{V}{\Sigma A + 4 \cdot m \cdot V} \quad [\text{s}]$$

In dieser Form wird sie auch Sabinesche Nachhallzeit T_{Sab} genannt. Sie berechnet sich lediglich in Abhängigkeit von dem Raumvolumen V und der Gesamtabsorptionsfläche A_{ges} des Raumes, zu der auch die Absorption durch die Luftschicht gehört (siehe E.3.3 “Äquivalente Schallabsorptionsfläche“). Allerdings liefert die Formel nach Sabine nur für Räume mit mittleren Schallabsorptionsgraden (Kap. 4.2.1, S. 80, Abs. 1) bis $\alpha_{\text{Raum}} = 0,2 \dots 0,3$ Ergebnisse mit einer ausreichenden Genauigkeit. Mit zunehmendem Absorptionsgrad α werden die Ergebnisse immer fragwürdiger. Für den theoretischen Grenzfall totaler Absorption aller Raumflächen müsste die Nachhallzeit auf Grund fehlender Reflexionen sich zu $T = 0$ s ergeben [Ste 97, S.139]. Die Formel nach Sabine liefert aber einen endlichen Wert. Aus diesem Grund definierte C.F. Eyring eine Formel auf Basis einer Reihenentwicklung, die den Fall totaler Absorption präziser beschreibt und für kleine Absorptionsgrade α in die Sabinsche Formel übergeht [Fas 98, S.140]:

$$T_{\text{Eyr}} = 0,163 \cdot \frac{V}{-\ln(1 - \alpha_{\text{Raum}}) \cdot S_{\text{ges}}} = 0,163 \cdot \frac{V}{-\ln(1 - \alpha_{\text{Raum}}) \cdot S + 4 \cdot m \cdot V} \quad [\text{s}]$$

In beiden Formeln wird die Nachhallzeit als eine statistische Größe des Raumes behandelt, die folglich an allen Hörerplätzen gleich groß ist. Diese Bedingung ist allerdings nur für einfache Raumgeometrien erfüllt, in denen zwischen allen Wänden eine “Sichtbeziehung“ besteht, es also keine Verdeckungen gibt. In einem Raum mit beispielsweise L-förmigen Grundriss kann zwar für

eine grobe Abschätzung der zu erwartenden Nachhallzeit auch die statistische Betrachtungsweise herangezogen werden, jedoch muss berücksichtigt werden, dass die Nachhallzeit räumlichen Schwankungen unterliegt.

Wird der Schalldruckpegel nach dem Beenden eines Schallereignisses an einer Hörposition aufgezeichnet, kann aus dessen Verlauf die Nachhallzeit direkt abgelesen werden, da in einem statistischen Schallfeld der Pegel, bis auf kleine zeitliche Schwankungen, nahezu geradlinig abfällt. Oftmals umfasst aber der Dynamikbereich zwischen dem anfänglichen Schalldruckpegel und dem Grundgeräuschpegel keine 60 dB. Als Verfahren für die Ermittlung der Nachhallzeit aus einer Abklingkurve wurde aus diesem Grund die lineare Gerade definiert, deren Neigung sich aus den Pegelwerten ergibt, an denen die Abklingkurve erstmals 5 dB sowie 35 dB unter den Anfangspegel gesunken ist. Diese Gerade wird anschließend auf einen Pegelabfall von 60 dB extrapoliert und die zugehörige Zeitdauer ergibt die Nachhallzeit. Auf diese Weise bestimmte Nachhallzeiten müssen dementsprechend als T_{30} gekennzeichnet sein. Zur besseren Veranschaulichung ist das Verfahren an einer schematisierten Abklingkurve in der Abb. 4.2 dargestellt.

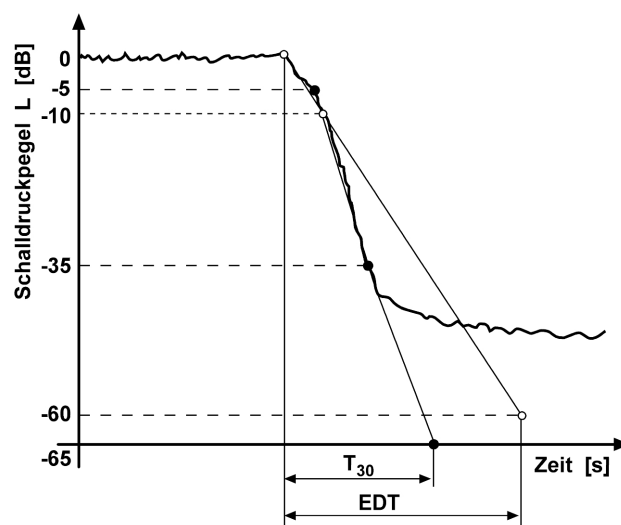


Abb. 4.2: Schematisierter Schalldruckpegelverlauf eines Nachhallvorgangs [Arn 04, S.52]

Nach der Sabineschen Nachhallformel ist die Dauer eines Nachhallvorganges von dem Volumen des Raumes und dessen Gesamtabsorptionsfläche abhängig. Da die schallabsorbierenden Eigenschaften von Materialien sowie von der Umgebungsluft stark frequenzabhängig sind, ergibt sich auch für den spektralen Verlauf der Nachhallzeit eine Frequenzabhängigkeit, die besonders in Kirchen unterschiedlicher Stilepochen infolge der differenzierten Ausstattung eine sehr unterschiedliche Charakteristik aufweisen kann. Die Nachhallzeit wird aus diesem Grund im Allgemeinen nicht als Einzahlwert angegeben, sondern ihr spektraler Verlauf über den

Frequenzbereich des menschlichen Hörvermögens dargestellt. Zu diesem Zweck wird das Frequenzband vorzugsweise in Oktav- bzw. Terzbänder unterteilt, deren Mittenfrequenzen den gesamten betrachteten Bereich repräsentieren (siehe E.1.2 “Frequenz und Wellenlänge“). Verwendung finden in der Raumakustik Frequenzen von 63 Hz bis 8000 Hz. Da das verwendete Simulationsprogramm lediglich die Ausgabe der Simulationsergebnisse in Oktavschritten von 125 Hz bis 4000 Hz anbietet, werden in den folgenden Untersuchungen auch nur diese 6 Oktavbänder betrachtet. Um bei Vergleichen der raumakustischen Eigenschaften zwischen mehreren Räumen nicht den vollständigen Frequenzverlauf angeben zu müssen, können die Nachhallzeiten arithmetisch über die Frequenz gemittelt werden. Nach DIN EN ISO 3382 sollten die Messwerte der tiefen Frequenzanteile von 125 Hz und 250 Hz als T_{low} , die mittleren Frequenzen 500 Hz und 1000 Hz als T_{mid} sowie die hohen Frequenzen von 2000 Hz und 4000 Hz als T_{high} zusammengefasst werden.

Als ein Maß für die Frequenzabhängigkeit der Nachhallzeit dient das Bassverhältnis, das die Nachhallzeit der tiefen Frequenzanteile T_{low} mit den Nachhallzeiten der mittleren Frequenzen T_{mid} ins Verhältnis setzt. Es ist damit charakterisierend für die Klangfarbe eines Raumes. Wegen der geringeren Lautstärkeempfindlichkeit des menschlichen Gehörs bei tiefen Frequenzen, ist in Räumen für Musikveranstaltungen ein Anstieg der Nachhallzeit bei tiefen Frequenzen erwünscht, wodurch dem Klang mehr “Wärme“ verliehen wird. Dies spiegelt sich im Bassverhältnis wieder, in dem für “gut“ eingestufte Hörbereiche in Konzertsälen Werte zwischen 1,1 bis 1,3 erreicht werden sollten [Fas 98, S.136].

$$\text{BR} = \frac{T_{125} + T_{250}}{T_{500} + T_{1000}} = \frac{T_{\text{low}}}{T_{\text{mid}}}$$

Im Gegensatz zu einem starken Direktschalleinfluss fördert der Nachhall das Verschmelzen einzelner Töne zu einem Gesamtklang und überbrückt damit kurze Lücken im zeitlichen Verlauf von Musikstücken, wodurch die melodische Linie eine größere Geschlossenheit erhält [Mey 03, S.47]. Die subjektive Empfindung des Nachhalls ist dabei auch von der Lautstärke des gespielten Tones oder gesprochenen Wortes abhängig. Besonders bei größerer Lautstärke vermittelt der Nachhall dem Hörer das Gefühl in das klangliche Geschehen eingebunden zu sein, das gerade in Kirchen zur akustischen Atmosphäre beiträgt. Dagegen erscheint bei leisen Musikpassagen der Nachhall kürzer als bei laut gespielten, da das Schallsignal schon früher unter den Grundgeräuschpegel gesunken ist. Die subjektiv empfundene Nachhalldauer stimmt dann nicht mit der messbaren Nachhallzeit überein [Fas 98, S.141]. Während die Nachhallzeit eines Pegelabfalls um 60 dB in Bezug zu den physikalischen Eigenschaften eines Raumes steht, entspricht der anfängliche Abfall des Schallsignals besser der subjektiv empfundenen Nachhalldauer. Für eine detailliertere Bewertung von Räumen für Musikdarbietungen ist zur Berücksichtigung dieses Effektes eine Anfangsnachhallzeit (Early Decay Time – EDT) definiert worden (Abb. 4.2), die sich durch

Extrapolation des Pegelabfalls der ersten 10 dB bestimmen lässt [Fas 98, S.141]. Sie ist wesentlich platzabhängiger als die Nachhallzeit und kann deshalb nicht für eine pauschale Charakterisierung eines Raumes verwendet werden. Je größer EDT im Vergleich zur Nachhallzeit ist, dass heißt je geringer der anfängliche Pegelabfall zum Gesamtpegelabfall ist, desto besser wurde in Untersuchungen ein Platz für Musikdarbietungen beurteilt [Fas 98, S.142].

4.1.2 Bewertung des Nachhalls

Eine Einordnung der raumakustischen Gütemerkmale muss immer auf die Funktion des Raumes bezogen sein. Bei Kirchen ist dies unter Umständen sehr schwierig, da teilweise extrem unterschiedliche funktionelle Anforderungen – auf Grund der Bandbreite der Ausgestaltung des Gottesdienstes – gestellt werden. Einerseits soll Sprache gut verständlich sein, aber auch Orgelmusik und große Chorwerke sollen in einer entsprechenden akustischen Atmosphäre aufgeführt werden können [Fas 98, S.211]. Beide Kriterien schließen sich hinsichtlich der akustischen Anforderungen teilweise aus, so dass sich auch die objektiven Bewertungskriterien für Sprachverständlichkeit und musikalische Klangwirkung deutlich voneinander unterscheiden. In Kirchen muss aus diesem Grund ein Kompromiss zwischen beiden Nutzungsvarianten gefunden werden oder dem Stellenwert einer Nutzungsart wird eine höhere Priorität durch die Einstufung der Bewertungskriterien hinsichtlich optimaler Werte beigemessen.

Die Sprachverständlichkeit gesprochener Worte nimmt mit zunehmender Nachhallzeit ab, da gesprochene Silben von dem Nachhall vorangegangener Silben überdeckt werden. Für Sprache wird aus diesem Grund eine möglichst kurze Nachhallzeit angestrebt. Allerdings gibt es auch hierbei Anforderungen an eine Mindestnachhallzeit. In einem Raum mit zu kurzem Nachhall wird in größerer Entfernung von einem Sprecher der Direktschall durch das Fehlen energiereicher Reflexionen nicht mehr ausreichend verstärkt und die Lautstärke nimmt stark ab. Das ist nicht nur für das Verstehen gesprochenen Worte ungünstig, sondern auch für den Sprecher ist es auf Dauer schwierig einen hohen Lautstärkepegel aufrecht zu erhalten [Fas 98, S.139].

Für musikalische Aufführungsräume ist im allgemeinen ein längerer Nachhall erwünscht, da dieser einzelne Töne zu einem Gesamtklang verbindet und so dem Zuhörer ein Gefühl von "Eingehülltsein" in die Musik vermittelt. Allerdings gibt es keine pauschale Angabe für eine optimale Nachhallzeit, da diese stark von dem musikalischen Charakter der Interpretation abhängt. Die als optimal empfundenen Nachhallzeiten für verschiedenartige musikalische Darbietungen entsprechen im Allgemeinen denen jener Räume, in welchen die Kompositionen zu ihrer Entstehungszeit aufgeführt bzw. für welche Räume sie komponiert wurden. Für Orgelwerke ist dementsprechend ein längerer Nachhall erwünscht als für sinfonische Musik oder gar Kammermusik. Für die Nachhallzeit, als eines der ältesten akustischen Bewertungskriterien, gibt

es auf Grund langjähriger Erfahrungen gesicherte Angaben für Optimalwerte. Diese beziehen sich im Allgemeinen auf das gemittelte Einzahlkriterium T_{mid} für die Oktavmittenfrequenzen bei 500 Hz und 1000 Hz. Mit dieser Angabe ist der wesentliche Frequenzbereich von ca. 350 Hz bis 1400 Hz abgedeckt, der viele Vokale der menschlichen Sprache enthält und in etwa einem Tonumfang von f' bis f'' entspricht [Mey 03, S.95]. In der Abb. 4.3 sind die allgemein gültigen Optimalwerte in Abhängigkeit des Raumvolumens und einer entsprechenden Nutzung in einem Diagramm dargestellt.

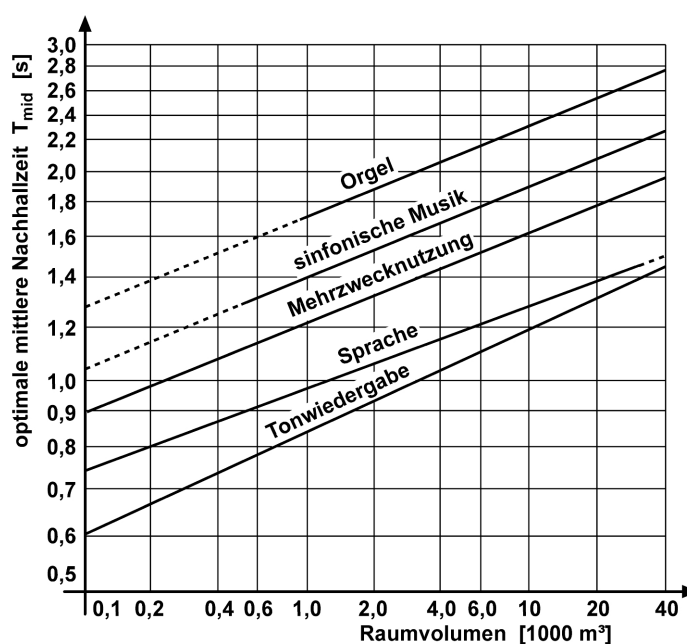


Abb. 4.3: Optimale mittlere Nachhallzeit T_{mid} in Abhängigkeit des Raumvolumens für verschiedene Nutzungsarten, in Anlehnung an [Fas 98, S.139]

Für eine objektive Bewertung der Halligkeit (Nachhallzeit) ist es wichtig zu wissen, welche kleinste Veränderung der Nachhallverhältnisse gerade noch spürbar sind. Für die kleinste noch wahrnehmbare Änderung kann jedoch kein Pauschalwert angegeben werden, da sie von der Länge der Nachhallzeit abhängig ist. In Räumen mit kurzem Nachhall unterhalb von 0,8 s sind bei Untersuchungen bereits Veränderungen von 0,02 s bemerkt worden. Oberhalb der 0,8 s – Grenze kann die Empfindlichkeit des Ohres mit etwa 3,5 % der jeweiligen Nachhallzeit angenommen werden. Da diese Werte unter Laborbedingungen ermittelt wurden [Mey 03, S.47], wird in der Praxis eine etwas gröbere Abstufung verwendet. Demnach brauchen Nachhallzeiten unter 2 s nicht exakter als auf eine zehntel Sekunde angegeben zu werden, und bei Nachhallzeiten oberhalb von 2 s reicht eine Genauigkeit von 5 % der jeweiligen Nachhallzeit aus [Mey 03, S.47]. Die Empfindlichkeit auf eine Veränderung der Nachhallzeit ist dabei unabhängig von dem betrachteten Frequenzbereich.

Eine Nachhalldauer gilt noch bei einer Abweichung von $\pm 20\%$ von den Optimalwerten der Abb. 4.3 als raumtypisch. In einem Raum für Sprachwiedergabe sollte dabei der Frequenzverlauf der Nachhallzeit annähernd linear verlaufen, während bei Räumen für Musikveranstaltungen ein Anstieg der Nachhallzeit im tieferen Frequenzbereich erwünscht ist, womit die geringere Empfindlichkeit des Ohres bei tiefen Frequenzen ausgeglichen werden soll. In Abb. 4.4 ist der frequenzabhängige Toleranzbereich für einen optimalen Nachhall dargestellt [Fas 98, S.138].

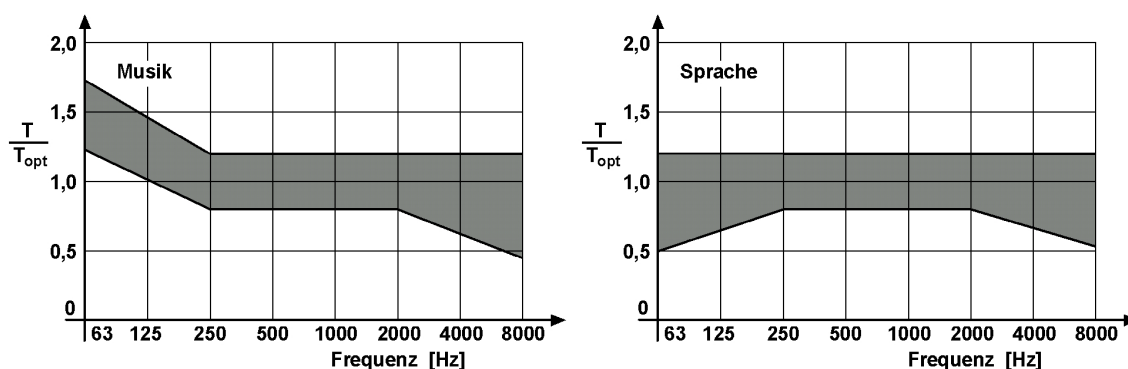


Abb. 4.4: Bereich optimaler Nachhallzeiten in Abhängigkeit der Frequenz, in Anlehnung an [Fas 98, 139]

Eine konkrete Angabe einer optimalen Nachhallzeit für Kirchen in Abhängigkeit des Volumens kann nicht pauschal getroffen werden. In einer Kirche soll die Predigt möglichst von allen Gottesdienstteilnehmern textlich verstanden werden, aber auch die Orgelmusik zu einer akustisch ansprechenden Atmosphäre beitragen. Durch verschiedene Autoren wurden Werte für optimale Nachhallzeiten angegeben [Mey 03, S.147], wobei jeder die Priorität auf andere Nutzungsansprüche gelegt hat. Bei Autoren, die den Hauptnutzungsanspruch einer Kirche in der Musik sehen, sind längere Nachhallzeiten erwünscht als bei Autoren, die von einer vorrangigen Rolle der Sprache im Gottesdienst ausgehen. Andere Autoren berücksichtigten diesen Umstand und unterteilen die Kirchen in verschiedene Sparten nach Predigt-, Musik- und Messekirchen. Je nach den unterschiedlichen Herangehens- bzw. Sichtweisen der einzelnen Autoren unterliegen die Angaben für eine optimale Nachhallzeit eines Kirchenraumes großen Schwankungen. Um die simulierte Nachhallzeit der ‘Himmelsburg’ hinsichtlich ihrer Lage einordnen zu können, wird sie mit den Angaben eines optimalen Nachhallbereiches nach Jürgen Meyer verglichen [Mey 03]. Er ermittelte die für gut befundenen Nachhallzeiten in Untersuchungen an Kirchen verschiedener Baustilepochen, in dem er die subjektiven Eigenschaften des Kirchenraumes von den Menschen beurteilen ließ, die ihn auch als solchen nutzen – den Gemeindemitgliedern.

Die Untersuchungen ergaben, dass der Frequenzgang der Nachhallzeit für eine Einordnung nach “gut” oder zu “trocken” befundene Akustik eine untergeordnete Rolle spielt. Maßgeblich war in erster Linie die Nachhallzeit im mittleren Frequenzbereich. Auch bei tiefen Frequenzen war der Absolutwert für die Beurteilung der Nachhallzeit entscheidender als das Verhältnis, in dem er zu mittleren und hohen Frequenzen stand. Daraus resultiert der Effekt, dass in Kirchen mit geringen Nachhallzeiten in tiefen Frequenzen auch die Nachhallzeit in mittleren Frequenzen – oberhalb des optimalen Bereiches – noch für gut befunden wurde. Damit kann die angegebene Grenze des optimalen Nachhallzeitbereiches bei Kirchen, deren Nachhallzeit zu tiefen Frequenzen hin abnimmt, etwas angehoben werden [Mey 03, S.147]. In dem Diagramm der Abb. 4.5 wird der von Meyer empfohlene Nachhallbereich für Kirchen dargestellt.

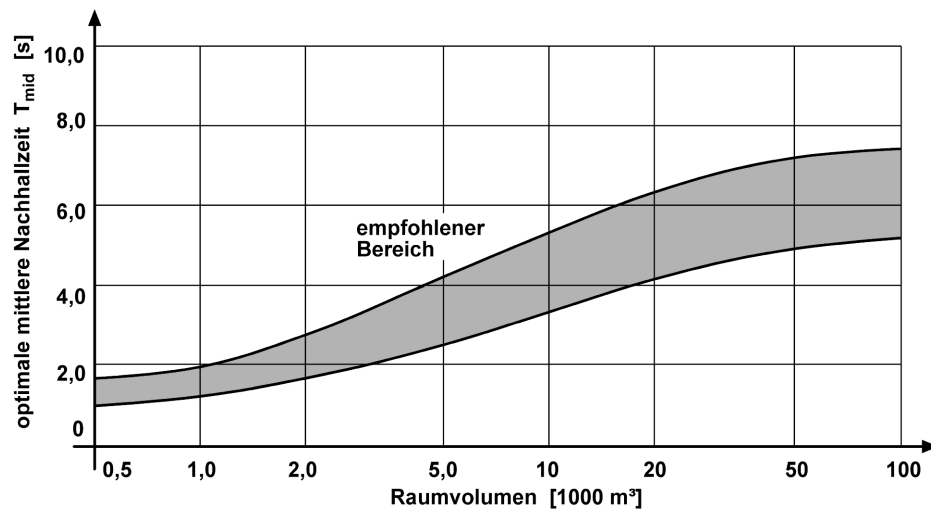


Abb. 4.5: Optimale Nachhallzeiten im mittleren Frequenzbereich für Kirchen im unbesetzten Zustand, in Anlehnung an [Mey 03, S.146]

4.1.3 Energiekriterien

Die unterschiedlichen Platzbereiche können durch weitere Kriterien beurteilt werden, die sich vorwiegend aus der zeitlichen und räumlichen Verteilung der am Hörerplatz eintreffenden Schallenergie ergeben. Sie charakterisieren die Energieanteile des Direktschalls und der frühen Reflexionsanteile und werden deshalb unter dem Begriff Energiekriterien zusammengefasst. Da das Quadrat des Schallwechseldruckes proportional zur Energie eines Schallsignals ist, wird in den Formeln der effektive Schallwechseldruck verwendet.

Nach dem Beenden einer Geräuscheinwirkung klingt auch im Freifeld oder schalltoten Räumen das Geräusch auf Grund der Trägheit des Gehörs noch nach. Dies geschieht praktisch unabhängig von der Frequenz und ist in etwa äquivalent zu einer Nachhallzeit von 0,35 s [Fas 98, S.52]. Folgen einem Schallsignal innerhalb dieser Zeit weitere kurzzeitige Signale, sind diese infolge der Verdeckungswirkung nicht zu unterscheiden und beide Signale werden als Einzelgeräusch wahrgenommen. Handelt es sich dabei um den Direktschall und einer ihm folgenden Reflexion, wird die Verständlichkeit gesprochener Vorträge erhöht.

Vergrößert sich der zeitliche Abstand zwischen dem Direktschall und den ersten Reflexionen, kommt es ab einem bestimmten Zeitpunkt zur Verwischung der Signale und die Verständlichkeit nimmt ab. Als Grenze zwischen nützlichen und störenden Reflexionen wird für Sprache üblicherweise ein Mittelwert von 50 ms angesetzt [DIN EN ISO 3382]. Für Musikdarbietungen ist diese Grenze etwas fließender und charakterisiert die empfundene Durchsichtigkeit und Klarheit. In der Praxis wird mit einem Wert von 80 ms gerechnet [DIN EN ISO 3382]. Erhöht sich der zeitliche Abstand zwischen Direktschall und energiereicher Reflexion weiter, kommt es zur Echoerscheinung. Für Sprache wird von einer Grenze, ab der eine Reflexion als getrenntes Signal wahrgenommen wird, von 100 ms ausgegangen [Fas 98, S.53].

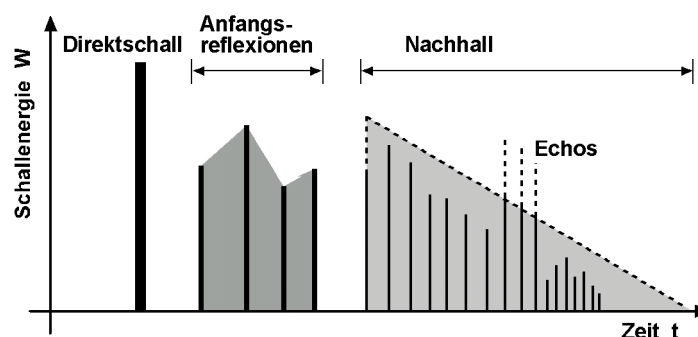


Abb. 4.6: Schematisierte Raumimpulsantwort, in Anlehnung an [Fas 98, S.149]

Die Energiekriterien werden in der Regel nicht für das gesamte Spektrum berechnet. Eine Beurteilung findet nur für den mittleren Frequenzbereich statt. Zum einen sind nicht ausreichende Kenntnisse über die subjektiven Empfindungen in anderen Frequenzen vorhanden, zum anderen ist die Oktavmittenfrequenz von 1000 Hz für die Verständlichkeit gesprochener Worte am aussagekräftigsten, da um diese Frequenz der Formantenbereich, das heißt die Lage der Vokale und stimmhaften Konsonanten der menschlichen Sprache, einzuordnen ist [Fas 98, S.27].

Für die Ermittlung der Energiekriterien muss die Raumimpulsantwort bekannt sein, in der die zeitliche Verteilung der an einer Hörerposition einfallenden Schallrückwürfe nach Anregung des Raumes mit einem Schallimpuls abgebildet ist. Mit einer solchen Raumimpulsantwort wird das Schallfeld für eine Schallquell- und eine Hörerposition vollständig beschrieben, weshalb auch das verwendete Simulationsprogramm eine solche Impulsantwort in Form eines Reflektogramms ermittelt. In diesem sind nicht nur der Direktschall und die im folgenden frühen Reflexionen sowie späte störende Reflexionen erkennbar. Über eine Integration nach der Zeit kann die Abklingkurve und damit die Nachhallzeit bestimmt werden. Der zeitliche Ablauf eines Schallsignals mit allen wichtigen Schallanteilen ist in der Abb. 4.6 am Beispiel einer schematisierten Raumimpulsantwort angegeben.

4.1.4 Deutlichkeit

Zeitig eintreffende Reflexionen verstärken den Direktschall und unterstützen damit die Verständlichkeit gesprochener Worte und die Durchsichtigkeit musikalischer Strukturen. Bei Sprache und sehr scharfen Zeitstrukturen in der Instrumentalmusik hat sich erwiesen, dass die in den ersten 50 ms eintreffende Schallenergie deutlichkeitsfördernd wirkt. Das kann mit dem Deutlichkeitsgrad D_{50} (definition) beschrieben werden, der die Verständlichkeit gesprochener Worte objektiv bewertet, in dem die in den ersten 50 ms eintreffende Schallenergie zur Gesamtschallenergie ins Verhältnis gesetzt wird [Fas 98, S.150]. Ein Wert von 50% bedeutet dabei, dass die Hälfte der Schallenergie in den ersten 50 ms eintrifft und der restliche Energieanteil darauffolgend.

$$D_{50} = 100 \cdot \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p_{\text{eff}}^2 dt}{\int_0^{\infty} p_{\text{eff}}^2 dt} \quad [\%]$$

Ein Maß für die Sprachverständlichkeit ist die in Untersuchungen ermittelte Silbenverständlichkeit, die bei 50% aller richtig verstandenen Silben eine gute und bei mehr als 70% eine sehr gute Textverständlichkeit gewährleistet. Eine Silbenverständlichkeit von 70% entspricht einem Deutlichkeitsgrad $D_{50} > 50\%$ [Fas 98]. Bei einer hinreichenden Lautstärke kann eine sehr gute Satzverständlichkeit noch bis zu einem Deutlichkeitsgrad von 28 % und eine gute Satzverständlichkeit bis etwa 20 % erreicht werden [Mey 03, S.149]. Voraussetzung für eine ausreichende Textverständlichkeit ist dabei natürlich eine an den Raum angepasste Sprechweise in Hinsicht auf Lautstärke, Tempo und Betonung. Eine subjektive Verbesserung oder Verschlechterung der Sprachverständlichkeit macht sich erst ab einer Veränderung des Deutlichkeitsgrades um 5 % bemerkbar [Bor 00].

4.1.5 Durchsichtigkeit

Die für Musik unerlässliche Halligkeit vermittelt dem Zuhörer das Gefühl von der Musik „umhüllt“ zu sein. Bei einer steigenden Nachhallzeit nimmt allerdings die Deutlichkeit des Klangbildes ab. Einzelne Stimmen und rhythmische Strukturen werden immer undeutlicher erkannt. Wie bei dem Deutlichkeitsgrad wird davon ausgegangen, dass früh eintreffende Reflexionen den Direktschall verstärken und dadurch die Klarheit des Klangbildes fördern. Bei Untersuchungen von Orchestermusik hat man herausgefunden [Mey 03, S.51], dass alle bis ca. 80 ms zum Direktschall verzögert eintreffenden Reflexionen der Klarheit bzw. Deutlichkeit eines Klangbildes dienlich sind, während alle später Folgenden die Klarheit beeinträchtigen. Ob im Bezug zu sakraler Musik eine etwas längere Zeitstruktur als 80 ms die subjektiven Empfindungen besser wiedergeben, ist nicht bekannt. Da aber die 80 ms nicht nur von der Zeitstruktur der Musik, sondern auch wesentlich von den Eigenschaften des menschlichen Gehöres bestimmt werden, erscheint eine Verlängerung der Verzögerungszeit nicht sinnvoll [Mey 03, S.51]. Die Erkennbarkeit zeitlich aufeinanderfolgender Töne (Zeitdurchsichtigkeit) sowie die Unterscheidbarkeit gleichzeitig gespielter Instrumente (Registerdurchsichtigkeit) wird objektiv mit dem Klarheitsmaß C_{80} (clarity) beschrieben, bei dem die in den ersten 80 ms eintreffende Schallenergie mit der nachfolgenden ins Verhältnis gesetzt wird [Fas 98, S.151].

$$C_{80} = 10 \cdot \lg \frac{\int_0^{80 \text{ ms}} p_{\text{eff}}^2 dt}{\int_{80 \text{ ms}}^{\infty} p_{\text{eff}}^2 dt} \quad [\text{dB}]$$

Bei einem Klarheitsmaß von 0 dB fällt innerhalb der ersten 80 ms die selbe Schallenergie an einer Hörerposition ein, wie in der darauffolgenden Zeit. Untersuchungen in Konzertsälen für Orchestermusik haben ergeben, dass für einen gut bewerteten Platzbereich das Klarheitsmaß Werte zwischen –2 dB und +4 dB, möglichst zwischen –2 dB und +1 dB, annehmen sollte, für weiter von der Schallquelle entfernt liegende Plätze sind teilweise auch Werte bis –5 dB akzeptabel [Mey 03, S.51]. Für die spezielle akustische Atmosphäre von Kirchenräumen liegen keine so detaillierten Untersuchungen vor. Es kann allerdings davon ausgegangen werden, dass etwas geringere Werte bis zu –6 dB noch als raumtypisch empfunden werden [Mey 03, S.53]. Eine subjektive Änderung der Schallfeldeigenschaften in Bezug zur Durchsichtigkeit des Klangbildes ist bei rhythmisch strukturierter Musik erst ab einer Änderung des Klarheitsmaßes von 0,5 dB bemerkbar, bei gebundener Satzweise sogar erst bei 1 dB, weshalb eine genauere Interpretation des Klarheitsmaßes nicht sinnvoll ist [Mey 03, S.52].

Ein weiteres Kriterium für die Beschreibung der Durchsichtigkeit ist die Schwerpunktzeit T_s (center time). Im Gegensatz zum Deutlichkeitsgrad und zum Klarheitsmaß zieht sie keine scharfe Grenze zur Unterscheidung zwischen günstigen und ungünstigen Reflexionen, sondern kennzeichnet den Zeitpunkt des Energiemaximums. Sie entspricht damit besser der tatsächlichen Schallwirkung. Soll die Verständlichkeit gesprochener Worte durch frühe Reflexionsanteile begünstigt werden, sollte die Schwerpunktzeit kleiner als 80 ms sein, während Reflexionen in den ersten 100 ms bis 150 ms der Durchsichtigkeit eines musikalischen Klangbildes dienlich sind. Die letzteren Angaben beziehen sich dabei wieder auf Untersuchungen zu Orchestermusik in Konzertsälen. Für sakrale Musik sind keine Anhaltswerte vorhanden.

$$T_s = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot p_{\text{eff}}^2 dt}{\int_0^{\infty} p_{\text{eff}}^2 dt} \quad [\text{ms}]$$

4.1.6 Raumeindruck

Für das Gefühl von Räumlichkeit sind vor allem die frühen seitlich einfallenden Reflexionen verantwortlich, die mit zunehmender Lautstärke den Eindruck vermitteln, dass sich die Schallquelle auszuweiten beginnt, wodurch der Klang an “Volumen“ zunimmt. Wesentlich verantwortlich ist dafür die in den ersten 80 ms seitlich an dem Hörerplatz eintreffende Schallenergie, die durch den Seitenschallgrad LF (lateral energy fraction) beschrieben werden kann.

Dieser ist als das Verhältnis der in den ersten 80 ms seitlich an einem Hörerplatz einfallenden Schallenergie (Direktschall ausgeschlossen) zu der gesamten Schallenergie der ersten 80 ms definiert [Fas 98, S.152].

$$LF = 100 \cdot \frac{\int_{5ms}^{80ms} p_{eff, seitlich}^2 dt}{\int_0^{80ms} p_{eff}^2 dt} = 100 \cdot \frac{\int_{5ms}^{80ms} p_{eff}^2 \cdot \cos^2(\theta) dt}{\int_0^{80ms} p_{eff}^2 dt} \quad [\%]$$

Die seitlichen Energieanteile – die sich messtechnisch durch die Verwendung eines Mikrofons mit spezieller Richtcharakteristik ermitteln lassen, das die von vorn kommenden Schallanteile ausblendet – ergeben sich aus der Blickrichtung des Hörers in Richtung Schallquelle. Die Integrationsgrenze von 5 ms stellt dabei sicher, das Direktschallanteile ausgeschlossen werden. In der angegebenen Formel geht die enthaltene Energie einer seitlich eintreffenden Reflexion unabhängig von ihrem Einfallswinkel θ ein. Wird dieser mit dem Betrag des Kosinus in der Bewertung berücksichtigt, ist das erhaltene Maß besser an die subjektiven Empfindungen des Raumeindrucks angepasst und der resultierende Seitenschallgrad wird mit LFC (einfallswinkelbewerteter Seitenschallgrad) bezeichnet [DIN EN ISO 3382, S.15]. Allerdings lässt sich dieser schwer messtechnisch aufnehmen, weshalb in der Literatur meist nur der Seitenschallgrad LF zur Charakterisierung eines Raumes verwendet wird [Wei 02, S.251].

$$LFC = 100 \cdot \frac{\int_{5ms}^{80ms} p_{eff}^2 \cdot |\cos(\theta)| dt}{\int_0^{80ms} p_{eff}^2 dt} \quad [\%]$$

Auf Grund der meist langen Nachhallzeit dominiert in Kirchen der Eindruck des “Eingehülltseins“ in die Musik, so dass die räumliche Klangentfaltung keine so gewichtige Rolle spielt. In kleinen bis mittelgroßen Kirchen, wie der Schlosskapelle der “Himmelsburg“, kann aber der Raumeindruck zum Gesamteindruck des Klangbildes beitragen. Da für Kirchen keine Erfahrungswerte vorhanden sind, dient als Bezugspunkt die Forderung, dass in Konzertsälen mit guter Akustik ein Seitenschallgrad von 25 % bis 40 % vorhanden sein sollte [Fas 98, S.152].

4.1.7 Lautstärke

Als ein Maß zur Beurteilung, mit welcher Lautstärke ein Schallsignal an einem Hörerplatz eintrifft, wurde das Stärkemaß G (strength factor) definiert. Da dieses von dem abgestrahlten Schalldruckpegel der Schallquelle abhängig ist, berechnet es sich aus dem Verhältnis der am Hörerplatz einfallenden Energie zu einer in 10 m Entfernung, mit der selben Schallquelle im Freifeld, gemessenen Schallenergie. Als günstig werden dabei Werte von der gleichen bis zur 10fachen Menge der in 10 m Entfernung gemessenen Bezugsschallenergie angesehen, das einem Stärkemaß von 0 dB beziehungsweise 10 dB entspricht [Fas 98, S.153]. Da Schalldruckunterschiede von 1dB gerade noch wahrnehmbar sind [Mey 03, S.37], sollte das Stärkemaß auch nicht detaillierter angegeben werden.

$$G = 10 \cdot \lg \frac{\int_0^{\infty} p_{\text{eff}}^2 dt}{\int_0^{\infty} p_{\text{eff},10\text{m}}^2 dt} \quad [\text{dB}]$$

4.2 Berechnungsverfahren

Für die akustische Rekonstruktion der Schlosskapelle in der “Wilhelmsburg“ stand das Simulationsprogramm “CATT-Acoustic v.8.0b“ zur Verfügung. Dieses Programm arbeitet auf der Grundlage der geometrischen Raumakustik. Dabei wird die Ausbreitung des Schalls durch Teilchen beschrieben, die sich entlang gerader, auf Wellenfronten senkrecht stehender Linien bewegen. In den Strahlen wird ein richtungsbegrenzter Teil der abgestrahlten Energie zusammengefasst und bei seiner geradlinigen Ausbreitung im Raum verfolgt. Die Welleneigenschaften des Schalls, wie Beugungs- und Interferenzeffekte, gehen allerdings bei dieser Methode verloren und können nicht berücksichtigt werden [Hen 99, S.230].

Für die Berechnung der akustischen Bewertungskriterien wertet das Programm die Impulsantwort des Raumes aus. Dafür wird von einer definierten Schallquelle eine große Anzahl an Teilchen mit einer bestimmten Anfangsenergie gleichzeitig in verschiedene Raumrichtungen abgestrahlt. Bei ihrer Ausbreitung mit Schallgeschwindigkeit (siehe E.1.3 “Schallgeschwindigkeit“) werden die Teilchen verfolgt, Absorptionsverluste bei Reflexionen an Hindernissen berücksichtigt und die verstrichene Zeit bis zum Eintreffen an einer festgelegten Hörerposition registriert.

4.2.1 Schallabsorption

In geschlossenen Räumen sind hauptsächlich der Direktschall und die Reflexionen an den Raumbegrenzungsflächen für die Eigenschaften des Schallfeldes verantwortlich. Dabei spielt die Richtung des am Hörerplatz einfallenden Schalls eine Rolle, sowie die Energie, die der Schall mit sich bringt. Trifft der Schall auf eine Oberfläche, geht ein Teil der Schallenergie verloren. Dieser Vorgang wird mit Absorption bezeichnet. Der Hauptanteil der absorbierten Energie wird durch Reibung in Wärme umgewandelt (Dissipationsverluste). Die restliche Energie transmittiert direkt durch den Gegenstand oder wird in Körperschall umgewandelt und so nach außen übertragen. Die Energiebilanz des Schalls beim Auftreffen auf ein Hindernis ist am Beispiel einer Wand in Abb. 4.7 in qualitativer Form dargestellt.

In der Raumakustik ist nur der Energieanteil des im Raum verbleibenden Schalls von Relevanz, der mit dem Schallreflexionsgrad ρ als Verhältnis von reflektierter zu einfallender Energie beschrieben werden kann. Die Gesamtheit der von einem Gegenstand absorbierten Energie wird in dem Schallabsorptionsgrad α (absorption coefficients) zusammengefasst [Fas 98, S.66]. Wird

der Schall vollständig an einer Fläche reflektiert ist $\alpha = 0$ und bei vollständiger Absorption ist $\alpha = 1$, so dass sich Absorption und Reflexion folgendermaßen ergänzen [Arn 04, S.36]:

$$\rho = \frac{W_\rho}{W_{\text{ges}}} ; \quad \alpha = \frac{W_\alpha}{W_{\text{ges}}} \quad \rightarrow \quad \alpha + \rho = 1$$

Zur Kennzeichnung der Energieverluste bei einer Reflexion an einem bestimmten Material oder einer Konstruktion, wird in praxisüblichen Berechnungsformeln der statistischen Raumakustik sowie als Eingabeparameter bei Simulationsprogrammen lediglich der Schallabsorptionsgrad α verwendet. Dieser ist von der Frequenz des untersuchten Schalls sowie von dem Einfallswinkel der Schallwelle abhängig. In der statistischen Raumakustik spielt der Einfallswinkel keine Rolle. In Simulationsprogrammen, die Schall in Form von Teilchen entlang von Strahlen verfolgen, kann der Einfallswinkel theoretisch berücksichtigt werden. Üblicherweise wird der Schallabsorptionsgrad frequenzabhängig, in einem sogenannten "Hallraum" nach DIN EN 20354 im diffusen Schallfeld und damit für allseitigen Schalleinfall, gemessen [Mom 00]. Nur für wenige Materialien stehen einfallswinkelabhängige Absorptionsgrade zur Verfügung. Erfahrungsgemäß ist es für die akustische Simulation von Räumen ohne extreme geometrische Abmessungen ausreichend, den über alle Einfallswinkel gemittelten Absorptionsgrad für allseitigen Schalleinfall zu verwenden [Vor 89, S.21]. Zudem verfügt das verwendete Programm "CATT-Acoustic" nicht über die Option der Eingabe eines winkelabhängigen Absorptionsgrades.

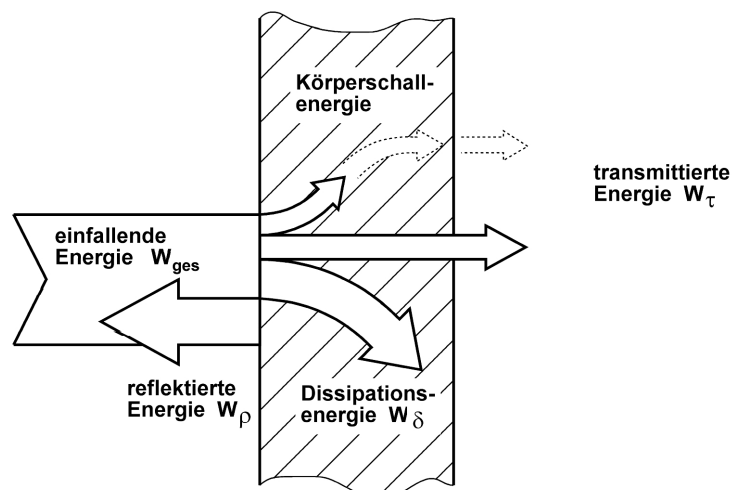


Abb. 4.7: Schallenergiebilanz an einer Wand, in Anlehnung an [Hen 99, S.233]

Der Schall verliert nicht nur bei Reflexionsvorgängen an Begrenzungsflächen Energie. Das Simulationsprogramm berücksichtigt auch die Abnahme der Intensität von Schallwellen infolge ihrer geometrischen Ausbreitung (siehe E.2.1 “Geometrische Ausbreitung“), sowie die Dämpfung durch das Übertragungsmedium (siehe E.2.2 “Dissipationsverluste an der Luftschicht“). In der Luft sind die Ausbreitungsverluste von der Umgebungstemperatur, der Luftfeuchtigkeit und im starken Maße von der Frequenz abhängig. In kleinen Räumen sind sie für den Direktschall und die ersten Reflexionen im Allgemeinen so klein, dass die Absorption durch die Luft auf Grund der kurzen Ausbreitungswege fast nicht wahrnehmbar ist. Legen die ersten Reflexionen von der Schallquelle zum Hörerplatz oder der Direktschall selbst lange Wege zurück, wie es in großvolumigen Räumen wie Kirchen der Fall ist, machen sich die Dissipationsverluste in der Luft besonders im hohen Frequenzbereich erheblich bemerkbar.

4.2.2 Schallreflexion

Trifft ein Teilchen auf eine Begrenzungsfläche, wird ein Teil der Energie absorbiert und der andere Teil in den Raum zurückgeworfen. Für die geometrische Beschreibung der reflektierten Schallanteile werden von “CATT-Acoustic“ verschiedene Reflexionsgesetze einbezogen. Dabei hängt die Art des Reflexionsverhaltens von dem Verhältnis der Schallwellenlänge zu den Abmessungen der reflektierenden Fläche ab, wobei die drei Formen von Reflexionsvorgängen nach Abb. 4.8 prinzipiell zu unterscheiden sind [Fas 98, S.104].

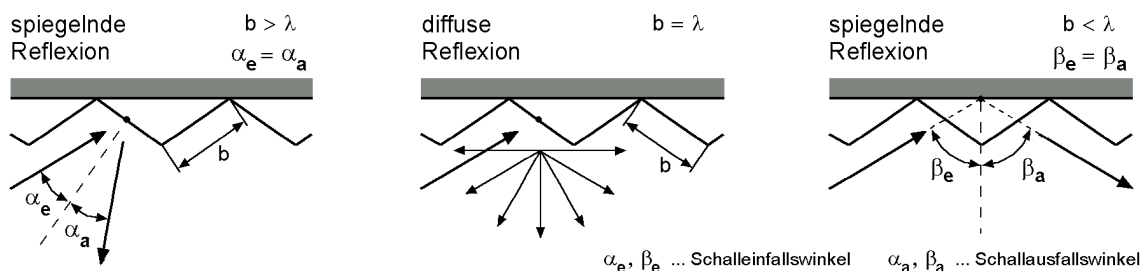


Abb. 4.8: Reflexionswirkungen einer Fläche mit Strukturen der Breite b in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ , in Anlehnung an [Fas 98, S.104]

An einer glatten, nicht strukturierten und hinreichend großen Fläche erfolgt der Reflexionsvorgang geometrisch gerichtet. Solche spiegelnden Reflexionen können mit den Gesetzen der Optik beschrieben werden [Fas 98, S.105], wie es schon im 17. Jahrhundert von Athanasius Kircher praktiziert wurde (Kap. 2.3.3, S. 29, Abs. 1). Einfallender und reflektierter Strahl

schließen mit der Normalen der Reflexionsfläche den gleichen Winkel ein und das Kugel- oder Wellenfeld, das durch den Strahl beschrieben wird, bleibt nach der Reflexion erhalten. Derart gerichtete Reflexionen treten an Flächen auf, deren Abmessungen größer als das 5fache der Wellenlängen sind. Ist die Strukturgröße der reflektierenden Oberfläche kleiner als etwa 1/5 der betrachteten Wellenlänge, bleiben diese Strukturen unwirksam (Abb. 4.8). Die Reflexion erfolgt dann geometrisch gerichtet an der Grundfläche [Fas 98, S.105].

Liegt die Größe der Strukturierung einer Reflexionsfläche zwischen dem 5fachen Wert und 1/5 der Wellenlänge, kommt es zu ungerichteten diffusen Reflexionen. Auf Grund der Wellenlänge des hörbaren Schalls von wenigen Zentimetern bis zu mehreren Metern (siehe E.1.2 “Frequenz und Wellenlänge“), decken die in der Architektur vorkommenden Strukturgrößen den ganzen Bereich von “sehr klein“ bis “groß“ gegen die Schallwellenlänge ab [Vor 89, S.23]. Damit wirkt jede Oberflächenstruktur für einen speziellen Frequenzbereich diffus streuend.

Am stärksten ist der Effekt diffuser Schallrückwürfe ausgeprägt, wenn die Tiefe der Struktur in etwa ein viertel bis zu einer halben Wellenlänge beträgt [Mey 03, S.25]. Sind diese gleichmäßig auf alle Raumwinkel verteilt, spricht man von völliger Diffusität. Üblicherweise bestehen aber Reflexionen aus diffusen sowie aus gerichteten Anteilen. In dem Programm “CATT-Acoustic“ kann die unterschiedliche Verteilung der Schallrückwürfe charakterisiert werden, indem den einzelnen Oberflächen ein Streugrad s (scattering coefficient) zugewiesen wird. Dieser ist durch das Verhältnis von nicht geometrisch reflektierter Energie zur gesamten reflektierten Energie definiert [Gom 02]. Die Größe gibt folglich an, welcher Energieanteil der geometrischen Reflexion verloren geht und in andere Raumrichtungen gestreut wird. Ist der Streugrad $s = 0$, so wird die gesamte Energie geometrisch gerichtet reflektiert und ein Streugrad $s = 1$ bedeutet, dass in Richtung der spiegelnden Reflexion keine Energie reflektiert wird.

Die Richtungsverteilung, das heißt die Gleichförmigkeit der Verteilung diffuser Reflexionsanteile, lässt sich mit dem Diffusitätsgrad oder Diffusionskoeffizienten (diffusion coefficient) beschreiben [Fas 98, S.111]. Für diesen Koeffizienten liegen jedoch fast keine Werte vor und das mathematische Modell für eine algorithmische Implementierung weist im allgemeinen eine komplizierte Struktur auf. Um eine exponentielle Teilchenvermehrung und den damit verbundenen Anstieg des Rechenaufwandes zu vermeiden, werden die gestreuten Anteile statistisch betrachtet [Sch 01]. In dem Programm “CATT-Acoustic“ wird die Richtungsverteilung der gestreuten Energie vereinfachend über die aus der Optik bekannte Lambertsche Streucharakteristik angenähert [Cat 02]. Untersuchungen haben ergeben, dass diese vereinfachte Annahme bei der Berechnung raumakustischer Parameter nur zu geringen Fehlern führt [Sch 01].

Die Implementierung des Streugrades in eine Simulation ist mit großen Unsicherheiten behaftet, da im Gegensatz zu den Absorptionsgraden Streugrade nur bedingt in der Literatur zu finden sind. Zur Zeit sind verschiedene Institutionen damit beschäftigt, geeignete Messverfahren zu

entwickeln, wobei vorerst hauptsächlich auf die Messung spezieller Diffusoren eingegangen wird. Für beliebige Baumaterialien und gebräuchliche Oberflächen müssen bisher die Streugrade zumeist qualitativ abgeschätzt werden [Mom 00].

In dem Handbuch von “CATT-Acoustic“ [Cat 02] werden Hinweise für die Abschätzung des Streugrades angeboten. Als Minimum für alle Flächen mit einer für die Architektur durchschnittlichen Größe und glatten Oberfläche wird ein Streugrad von 10-20% in den Frequenzen zwischen 125 Hz und 4000 Hz angegeben. Handelt es sich um große und sehr glatte Oberflächen, wie Spiegel oder Metallplatten, soll bei 4000 Hz der Streugrad maximal 10% betragen. Bei rauen Oberflächen ist ein Wert von 80% bei der Frequenz anzusetzen, bei der die Strukturtiefe in etwa der Wellenlänge entspricht oder größer ist. Für niedrigere Frequenzen kann der Streugrad allmählich verringert werden, wobei es im Zweifelsfall immer besser ist einen höheren als einen zu niedrigen Wert anzusetzen. Da Publikumsflächen bis in den tiefen Frequenzbereich hinein den Schall stark diffus streuen, wird ein Streugrad zwischen 30-80% angegeben [Cat 02, S.11-3]. Falls Unsicherheiten bestehen, wie stark sich die Streugrade auf die Simulationsergebnisse auswirken, wird empfohlen, mehrere Rechnungen mit leicht veränderten Parametern durchzuführen. Durch einen Vergleich der Simulationen kann festgestellt werden, wie sensibel die Ergebnisse auf eine Veränderung der Streugrade reagieren. In der Tabelle 4.1 sind die empfohlenen Streugrade s für die raumakustisch untersuchten Oktavmittenfrequenzen zusammengefasst.

Tabelle 4.1: Empfohlene Streugrade s [Cat 02, S.2-82, S.11-3]

Beschreibung	Oktavmittenfrequenzen [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
große Flächen mit glatte flache Oberfläche	0,08	0,08	0,09	0,09	0,10	0,10
Flächen mit durchschnittlicher Größe und glatter Oberfläche	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20
Flächen mit einer rauen Oberfläche, in etwa für Strukturen von 30cm oder kleiner	0,10	0,15	0,30	0,60	0,80	0,80
Publikumsfläche	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80

4.2.3 Beugung

Trifft eine Schallwelle während ihrer Ausbreitung auf ein Hindernis mit begrenzten Ausmaßen, entstehen Störstellen im Schallfeld. An den Kanten des Hindernisses bilden sich neue Schallwellen aus, die sich kugelförmig ausbreiten, so dass auch hinter das Hindernis ein Teil der Schallenergie gelangt. Dieser Beugungseffekt ist stark von der Größe der Wellenlänge und der Ausdehnung des Hindernisses abhängig. Je kleiner die Wellenlänge, d.h. um so größer die Frequenz ist, desto geringer ist die Schallbeugung und hinter dem Hindernis entsteht ein Schallschatten. Entspricht die Größe des baulichen Details in etwa der Wellenlänge oder ist sie kleiner als diese, wird der Schall vollständig um den Gegenstand herumgebeugt und es tritt keine Störung auf [Mey 03, S.17]. Hinter einem Gegenstand, der die Sicht auf die Schallquelle verdeckt, kommt es damit zu einer Verschiebung der Klangfarbe (lineare Verzerrung), dass heißt ein dumpferer Klang ist zu vernehmen, da tiefe Frequenzanteile um das Hindernis herumgebeugt werden und man sich in einem Schallschatten hoher Frequenzen befindet [Kir 02, S.13]. Dabei ist zu berücksichtigen, dass an einem Hörerpunkt hinter einem Gegenstand, aber mit einer gerade noch vorhandenen Sichtbeziehung zur Schallquelle, unabhängig von der Frequenz und der Größe des Gegenstandes, eine Schallpegelverringerung von 5 – 6 dB auftritt [Mey 03, S.17]. Dies ist mit dem Energieerhaltungssatz zu begründen, da durch die Beugung Schallenergie in Bereiche hinter das Hindernis gelangt, die ohne Beugungseffekt nicht mit Schall versorgt werden würden. Damit tritt auch in der Nähe eines Hindernisses eine Veränderung des Schallfeldes auf.

In der “Himmelsburg“ trat dieser physikalische Effekt besonders hinter den Pfeilern der Emporen in Erscheinung. Da das verwendete Simulationsprogramm auf der Verfolgung von Strahlen basiert, können derartige wellentypische Eigenschaften des Schalls nicht simuliert werden. Um die quadratischen Pfeiler mit einer Abmessung von 70 cm wurden alle Frequenzen unterhalb von ca. 500 Hz vollständig herumgebeugt, während für Frequenzen oberhalb von 500 Hz ein Schallschatten hinter den Pfeilern entstand und damit eine Veränderung der Klangfarbe. Die Simulation wird aus diesem Grund besonders unterhalb der Emporen keine exakten Werte liefern, was bei der Bewertung der Simulationsergebnisse unbedingt berücksichtigt werden sollte.

Beugungseffekte wirken sich aber nicht nur auf das Schallfeld hinter einem Hindernis aus, sie sind auch im Randbereich der Reflexionsflächen bzw. an Flächen begrenzter Abmessungen zu spüren. “Aus wellentheoretischen Überlegungen sollte die Reflexionsfläche so groß sein, dass der Weg eines Schallstrahles, der von der Quelle zum Hörer über den Randbereich der Reflexionsfläche läuft, um mindestens eine viertel Wellenlänge länger ist als der Weg eines Schallstrahles über die Mitte der Reflexionsfläche.“ [Mey 03, S.23]. Im Randbereich einer Fläche, dass heißt in der Nähe der Kanten, entwickeln die Reflexionen infolge von Beugungserscheinungen nicht mehr die volle Wirkung einer geometrisch gerichteten Reflexion. Dieser Kantenbeugungseffekt ist damit vorwiegend von den geometrischen Abmessungen der Bauteilfläche abhängig. Besonders

bei verhältnismäßig gegenüber der Wellenlänge kleinen Bauteilen betrifft das einen großen Bereich der gesamten Oberfläche.

Das Simulationsprogramm berücksichtigt die Kantenbeugung, indem im Randbereich von Flächen der Schall diffus gestreut wird. Dafür wird ein zusätzlicher Streugrad e (edge diffusion) eingeführt. Im Gegensatz zum Streugrad s ist dieser nicht von der Rauigkeit der Oberfläche abhängig, sondern lediglich von der Größe der Fläche. Aus diesem Grund braucht der Nutzer des Programms nur die Flächen angeben, bei denen eine Kantenstreuung berücksichtigt werden soll und das Programm ermittelt aus der Bauteilfläche den Koeffizienten für die unterschiedlichen Frequenzen selbst. Auf den Einfallswinkel wird dabei nicht eingegangen, sondern nur in dem Bereich einer viertel Wellenlänge von der Objektkante der Streugrad e angesetzt. Dieser Bereich wird an einer Beispielfläche für zwei unterschiedliche Frequenzen in Abb. 4.9 verdeutlicht. Die Kantenbeugung wird in der Simulation nur bei Reflexionen erster Ordnung, also bei Strahlen, die erstmals auf eine Raumbegrenzungsfläche treffen, als zusätzliche diffuse Schallstreuung im Bereich einer viertel Wellenlänge von der Außenkante berücksichtigt. Bei Reflexionen höherer Ordnung wird zur Minimierung des Rechenaufwandes ein effektiver Streugrad aus e und s in Abhängigkeit der Bauteiloberfläche berechnet, der auf die gesamte Flächengröße angesetzt wird. Berücksichtigt werden sollte die Kantenbeugung bei allen Flächen mit einer glatten flachen Oberfläche, die in Bezug zur Wellenlänge nur eine geringe Ausdehnung haben [Cat 02, S.2-74].

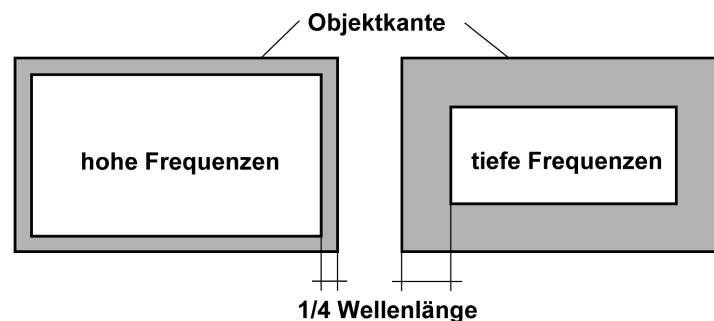


Abb. 4.9: Anwendungsbereich der Kantenbeugung in "CATT-Acoustic", in Anlehnung an [Cat 02, S.2-74]

4.2.4 Simulationsverfahren

Vor der Durchführung der Simulationen müssen die Raumgeometrie, die Schallquellen und Schallempfänger sowie ihre Positionen definiert werden. Das Geometriemodell baut sich aus einzelnen, ebenen Flächen zusammen, denen Absorptions- und Streueigenschaften zugewiesen werden. Gekrümmte oder runde Flächen müssen durch Polygone oder mehrere Flächen angenähert werden, wobei auf eine zu hohe Genauigkeit verzichtet werden kann. Strukturen bis zu einer Größe von 20 cm bis 30 cm sind zu vernachlässigen und durch die Wahl eines geeigneten Streugrades zu berücksichtigen, da eine zu hohe Flächenanzahl den Rechenaufwand erhöht und sich negativ auf die Ergebnisse auswirken kann.

Für die imaginäre Schallquelle stehen verschiedene Arten von Schallerregern zur Verfügung, denen eine frequenzabhängige Schallleistung sowie Richtcharakteristik zugewiesen werden kann. Dadurch ist es möglich, die Abstrahleigenschaften verschiedener Musikinstrumente oder von menschlichen Sprechern nachzubilden. Dient eine Simulation der Ermittlung raumakustischer Bewertungskriterien, sollte ein omni-direktionaler Schallerreger verwendet werden, der den Schall ungerichtet und gleichmäßig in alle Raumrichtungen abstrahlt. Dies ist wichtig für eine Einordnung der simulierten Bewertungskriterien, da diese in der DIN EN ISO 3382 für aus Messungen ermittelbare Parameter definiert sind, in der die Verwendung einer omni-direktionalen Schallquelle vorgeschrieben ist.

Das Programm “CATT-Acoustic“ verwendet drei verschiedene Methoden zur Ermittlung der akustischen Kennwerte. Bei dem Spiegelschallquellenverfahren (Image Source Model – ISM) wird der Schallausbreitungsweg über Reflexionsflächen durch virtuelle Schallquellen nachgebildet. Dabei werden alle gerichteten Reflexionen, sowie diffuse Schallrückwürfe bis zur Reflexion erster Ordnung zwischen einer Schallquelle und einem Empfängerpunkt ermittelt, in dem für jede eingegebene Oberfläche ein Image-Source-Modell erstellt wird. Da aber der Rechenaufwand mit der Ordnung der Reflexionen exponentiell ansteigt, wird ein Abbruchkriterium in Form der höchsten Reflexionsordnung oder der maximalen Strahlenverfolgungszeit formuliert. Raumakustische Parameter, Nachhall oder Eigenschaften des diffusen Schallfeldes können damit nicht mehr berechnet werden. Die Genauigkeit dieser Methode ist aber im Vergleich mit anderen Verfahren am größten, so dass sie für die Analyse der frühen Reflexionsanteile sowie ihrer Ausbreitungspfade eingesetzt wird.

Späte Schallanteile werden mit der Strahlenverfolgungsmethode (ray-tracing) simuliert, da deren Rechenzeit nur von der Anzahl der ausgesendeten Strahlen und deren Verfolgungszeit abhängig ist. In “CATT-Acoustic“ können mit diesem Verfahren (audience area coverage mapping) die akustischen Parameter in Form von Schallkarten dargestellt werden, vorzugsweise über der vom Publikum besetzten Fläche. Über den ausgewählten Flächen, auf denen die Parameter dargestellt werden, wird ein quadratisches Netz mit definierbarer Größe gelegt, dass die Flächen in einzelne

Detektorfelder unterteilt. Jedes kubische Detektorfeld stellt einen Schallempfänger mit einer durch das Netz festgelegten Größe dar. Wird ein Detektorfeld von einem Schallstrahl gestreift, so wird dessen Energie, Laufzeit und Einfallsrichtung registriert. Dadurch entstehen farbige Schallkarten, auf denen die Verteilung der verschiedenen Schallfeldparameter und Bewertungskriterien im Raum abgelesen werden können.

Sollen die Schallfeldgrößen und Bewertungskriterien an bestimmten Hörerpositionen ermittelt und numerisch dargestellt werden, wie das auch bei akustischen Messungen durch die Mikrofonpositionen geschieht, wird eine Kombination beider Verfahren verwendet. In der angewendeten Methode “Randomized Tail-corrected Cone-tracing“ (RTC) werden die frühen Schallanteile wegen der höheren Genauigkeit des Verfahrens nach der Spiegelschallquellenmethode ermittelt und durch die Ergebnisse der Strahlenverfolgung mit einem cone-tracing-Verfahren ergänzt. Das cone-tracing ist eine spezielle Art des ray-tracing, bei dem die Schallstrahlen keinen festen Ausschnitt der Kugelwelle darstellen, sondern durch einen Kreiskegel mit definiertem Öffnungsdurchmesser beschrieben werden. Der Querschnitt des Kreiskegels vergrößert sich deshalb mit wachsender Laufzeit des Strahles. Als Ergebnis einer solchen Simulation erhält man ein Reflektogramm (auch Echogramm), in dem die einzelnen, an einem Hörerpunkt eintreffenden Strahlen nach ihrer enthaltenen Energie und Laufzeit aufgelistet sind. Ein Reflektogramm entspricht damit der Raumimpulsantwort des Raumes [Wei 02, S.135], aus der die Nachhallzeit sowie die Energiekriterien abgeleitet werden können.

4.2.5 Schlussfolgerung

Die Rechengenauigkeit raumakustischer Simulationsprogramme und die Streubreite der simulierten Schallfeldparameter wurde bereits mehrfach von der Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) in Vergleichsrechnungen überprüft, an denen sich Programmentwickler und Anwender in gleicher Form beteiligten. Bei dieser Untersuchung wurden die Simulationsergebnisse den Messwerten eines realen Raumes einfacher Geometrie gegenübergestellt. Dabei waren deutlich die größeren Abweichungen bei tiefen Frequenzen zu erkennen, was auf die Beschränkung der Programme auf eine geometrische Schallausbreitung zurückzuführen ist, bei der die Welleneigenschaften des Schalls vernachlässigt werden [Bor 00], [Bor 02], [ptb 04].

Sollen demnach in einem raumakustischen Simulationsprogramm, das auf Basis von Strahlenverfolgung mit geometrischer Ausbreitung des Schalls arbeitet, alle Beugungs- und Streueffekte mit einbezogen werden, sind streng genommen mehrere Modelle in Abhängigkeit der Wellenlänge anzufertigen [Sch 01]. Für tiefe Frequenzen ist ein Modell mit sehr einfacher Geometrie zu erstellen, bei dem kleine Strukturen wie Treppenstufen durch nahezu spiegelnd reflektierende Flächen ersetzt bzw. Details wie freistehende Stützen mit geringen Ausmaßen

vernachlässigt werden. Für den mittleren Frequenzbereich ist ein Modell mit komplizierten Streucharakteristiken notwendig und in einem weiteren Modell für hohe Frequenzbereiche sind kleine Strukturen detailliert zu modellieren. Allerdings ist das Ziel einer raumakustischen Simulation im Allgemeinen keine exakte Berechnung der physikalischen Schallfeldparameter, sondern eine hinreichend genaue Vorhersage objektiver und subjektiver Bewertungskriterien, insbesondere der Abweichung der Nachhallzeit gegenüber der statistischen Nachhalltheorie. Die Anwendung derartiger Simulationsprogramme für eine Berechnung der akustischen Verhältnisse eines Raumes ist damit legitim, sofern die Einflüsse der Eingabegrößen auf das Rechenergebnis beachtet werden. Bei der Simulation der "Himmelsburg" liegt damit die Hauptfehlerquelle offensichtlich in den getroffenen Ausgangsparametern, dass heißt in der Annahme der Absorptionswerte bzw. in der mangelhaften Kenntnis der Streueigenschaften der verschiedenen Oberflächenstrukturen. Die aus den festgelegten Randbedingungen resultierenden Abweichungen sind wohl um ein Vielfaches höher als die Fehler infolge des Simulationsverfahrens.

4.3 Untersuchung des Referenzobjekts

Bei der raumakustischen Untersuchung der “Himmelsburg“ steht neben der Funktion des Raumes zum Abhalten der Predigt die Aufführung musikalischer Vorträge im Vordergrund, die vorzugsweise von der Musikerempore aus gegeben wurden. Da die “Capella“ nur über eine verhältnismäßig geringe Kopplungsfläche an den Kirchenraum angeschlossen war, muss die Raumakustik der Schlosskapelle als eine Kombination beider Räume betrachtet werden. Besonders da die akustische Ausstattung (Absorptions- und Streueigenschaften) beider Räume unterschiedlich war und damit jeder Raum eine typische Klangfärbung besaß. Das Hauptproblem bei gekoppelten Raumsystemen ist hauptsächlich die Abschattung des Direktschallanteils, so dass auf Grund der Welleneigenschaften des Schalls der Einfluss von Beugungseffekten überwiegt.

In der “Himmelsburg“ bestand vor allem von den oberen Emporen aus kein direkter Sichtkontakt zu den Musikern, so dass der Direktschallanteil die Zuhörer nicht auf geradlinigen Weg erreichen konnte. Tiefe Frequenzanteile wurden aber um die Deckenöffnung der Musikerempore gebeugt und haben so die Hörerplätze auf den Emporen sowie hinter den Pfeilern erreicht. Demzufolge war auf Hörerplätzen ohne Sichtbeziehung zu den Musikern eine Veränderung der wahrnehmbaren Klangfärbung zu verzeichnen.

Da das verwendete Simulationsprogramm den Schall entlang von Strahlen verfolgt, werden diese gebeugten Schallwellen, die den Hörerplatz zuerst erreichen, nicht berücksichtigt. Damit treffen in der Simulation veränderte Energieanteile in einer anderen zeitlichen Folge an dem Hörerplatz ein, was auf die eher statistisch begründete Nachhallzeit keine großen Auswirkungen hat, aber speziell zur Veränderung der Energiekriterien führt. Dieses Problem kann durch Verwendung einer angemessen hohen Anzahl an Strahlen verringert werden [Cat 02, S.2-73]. Über die Genauigkeit, mit der die Energiekriterien aus einer simulierten Impulsantwort eines gekoppelten Raumsystems – wie in der Schlosskapelle der “Wilhelmsburg“ – mit messtechnisch ermittelten Energiekriterien übereinstimmen, kann aber keine Aussage getroffen werden, da derzeit noch unzureichende Untersuchungen vorliegen [Cat 02, S.2-72].

Um die Einflussgröße der Vernachlässigung von Beugungseigenschaften in der Simulation einordnen zu können sowie die Übereinstimmung der nach Vorgaben aus der Fachliteratur ausgewählten Materialparametern zu überprüfen, wird vor der Untersuchung der “Himmelsburg“ das Schallfeld des Referenzobjektes – das Bosehaus in Leipzig mit akustisch ähnlichen Verhältnissen – messtechnisch aufgenommen und mit Simulationsergebnissen verglichen.

4.3.1 Sommersaal im Bosehaus

Das Bosehaus in Leipzig ist der heutige Sitz des Bach-Archivs und eines der ältesten erhaltenen Gebäude an der Südseite des Thomaskirchhofs. 1711 ließ Georg Heinrich Bose, ein enger Befreundeter der Familie Bach, das aus dem 16. Jahrhundert stammende Gebäude umgestalten [bac 04] und im Südflügel einen barocken Fest- und Konzertraum errichten. Das markanteste Merkmal dieses so genannten “Sommersaals“ war eine über dem Saal befindliche Schall- oder Echokammer, die über eine Öffnung in der gewölbten Decke mit dem darunter liegenden Saal verbunden war, wobei die Möglichkeit bestand, die Deckenöffnung bei Bedarf mit einem beweglichen Deckenplafond zu verschließen [sch 04/3]. Bei Solo- und Konzertdarbietungen kammermusikalischer Gruppen konnten die Musiker mit akustischen Effekten überraschen, wenn sie von der Schallkammer aus musizierten. Ähnlich wie bei einem Orchestergraben, ergab sich auf Grund der akustischen Wahrnehmbarkeit aber einer fehlenden Sichtbeziehung zu den Musikern ein ungewöhnliches Klangbild.

Im Laufe der Zeit unterlag dieses Gebäude mehrfach baulichen Veränderungen, bei denen auch die Musikerempore als Besonderheit des Sommersaales entfernt wurde. Im Zuge von Renovierungsarbeiten Ende der 90iger Jahre sollte der Saal in den Zustand von 1711 zurückversetzt werden. Die Umbauarbeiten wurden Ende 2002 abgeschlossen und der Raum befindet sich seit dem annähernd in dem Zustand, wie ihn Bach und seine Zeitgenossen erlebt haben dürften. Damit ist dieser Raum geradezu prädestiniert für eine Analyse der Simulationsgenauigkeit. Für die Auswahl war vordergründig die Tatsache verantwortlich, dass der Sommersaal durch die Ankopplung einer Musikerempore eine ähnliche akustische Eigenart wie die “Himmelsburg“ besitzt. Des weiteren wurde bei den denkmalpflegerisch begleiteten Restaurierungsmaßnahmen auf möglichst historische Baukonstruktionen und annähernd identische Materialien Wert gelegt, wodurch auch die Wahl der Absorptions- und Streuparameter für historische Baumaterialien überprüft werden konnte. Ein Unterschied zwischen beiden Räumen besteht lediglich in dem viel geringeren Raumvolumen des Sommersaals gegenüber der “Himmelsburg“ sowie den damit verbundenen unterschiedlichen Nutzungsansprüchen. Der Sommersaal diente ausschließlich der Aufführung von Kammermusik, für die – in Bezug zu sakraler Kirchenmusik – andere Anforderungen an die Raumakustik gestellt werden (Kap. 4.1.2, S. 71, Abs. 2). Für die Überprüfung der Simulationsgenauigkeit eines angekoppelten Raumes und den damit verbundenen Beugungseffekten bieten sich die vorhandenen Verhältnisse an.

4.3.2 Messdurchführung

Für die Untersuchung des Referenzobjektes sind die verschiedenen Schallfeldparameter mit dem rechnergestützten Messsystem “WinMLS 2000“ (siehe E.4 “Messsystem WinMLS 2000“) erfasst und daraus die akustischen Bewertungskriterien abgeleitet worden. Mit der Messsoftware wurde ein MLS-Signal erzeugt, über einen Dodekaeder in den Raum abgestrahlt und der Verlauf des Schallwechseldrucks anschließend an ausgewählten Hörerpositionen mit einem Kugelmikrofon aufgezeichnet. Der Schallerreger sowie das verwendete Mikrofon erfüllen mit einer angenähert kugelförmigen Richtcharakteristik die Anforderungen nach DIN EN ISO 3382. Neben den Schallfeldparametern ist während der gesamten Messdurchführung der Verlauf von Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit für die spätere Simulation protokolliert worden.



Abb. 4.10: Blick in den Sommersaal während der Messdurchführung

Bei der Wahl der Messpositionen sind die Anforderungen der DIN EN ISO 3382 an einen Mindestabstand zwischen Mikrofon und Raumbegrenzungsfläche von etwa 1 Meter und zwischen zwei Mikrofonen von etwa 2 Metern eingehalten worden. In dieser Norm werden für die Ermittlung der Nachhallzeit und der anderen akustischen Parameter zwei Schallquellpositionen vorgeschrieben. Damit soll der Messfehlereinfluss auf die Nachhallzeit möglichst gering gehalten werden, da die Nachhallzeit als statistische Größe bei einer Messauswertung über alle Messpunkte gemittelt wird. Bei der Untersuchung des Sommersaales wurde der Raum im unteren Saalbereich sowie von der Musikerempore aus angeregt, womit die wesentlichsten Standorte von möglichen Aufführenden erfasst wurden.

Da sich raumakustische Bewertungskriterien immer auf das statische Schallfeld beziehen, muss ein zu starker Direktschalleinfluss ausgeschlossen werden. Dies wird über einen festgelegten Mindestabstand der Mikrofone zu dem Schallerreger erreicht, der durch den Hallradius (siehe E.3.2 “Nahfeld und Hallradius“) definiert ist. Der Hallradius wurde vor der Messdurchführung abgeschätzt und die Mikrofonpositionen daraufhin außerhalb des Hallradius gleichmäßig im Raum verteilt (normale Messpunktdichte – DIN EN ISO 3382). Die Höhe der Mikrofone wurde auf eine Höhe von 1,20 m, das der Ohrhöhe eines durchschnittlichen sitzenden Zuhörers entspricht, eingestellt und der Dodekaeder auf eine Höhe von 1,60 m, der Ohrhöhe eines stehenden Musikers.



Abb. 4.11: Blick von der Schallkammer durch die Deckenöffnung in den Sommersaal

Bei der Untersuchung des Sommersaals wurden drei verschiedene Raumzustände erfasst. Im ersten Messschritt (Zustand I) blieb der Deckenplafond geschlossen, so dass in der späteren Simulation die Eingabeparameter (Absorptions- und Streueigenschaften) bei einer einfachen Raumgeometrie und ohne den Einfluss eines angekoppelten Raumes kontrolliert werden konnten. Im zweiten Schritt (Zustand II) wurde der Deckenausschnitt geöffnet, die Schallanregung geschah wie im ersten Messdurchlauf im unteren Saalbereich, so dass sich lediglich das Raumvolumen erhöhte. Im letzten Schritt (Zustand III) ist der Dodekaeder auf der Musikerempore platziert worden, wobei darauf zu achten war, dass ein Teil der Hörerpositionen mit Direktschall versorgt werden konnten. Eine Zusammenstellung aller Messzustände mit den zugehörigen Messpositionen wird in der Tabelle 4.2 dargestellt.

Ein visueller Eindruck des Sommersaales und der angekoppelten Musikerempore während der Messaufnahme am 18.10.2004 wird durch die Abb. 4.10 und Abb. 4.11 vermittelt. Die Lage der Mikrofon- und Schallquellenpositionen ist den Grundrissen aus Abb. 4.12 für den Sommersaal und aus Abb. 4.13 für die Musikerempore zu entnehmen. Die genauen Koordinaten sowie eine maßstäbliche Darstellung der Grundrisse, inklusive exakter Vermassung, werden im Anhang E.5

“Referenzobjekt Sommersaal im Bosehaus“ wiedergegeben. Für den unteren Saalbereich ist um die Schallquelle der größte Hallradius mit gestrichelter Linie angedeutet, der sich bei den Messungen aller drei Zustände ergab. Es ist zu erkennen, dass sich alle Mikrofonpositionen außerhalb des Hallradius befinden und damit in die Auswertung einbezogen werden konnten.

Tabelle 4.2: Messzustände, Bosehaus

	Deckenöffnung	Raumvolumen	Schallquellposition	Mikrofonpositionen
Zustand I	geschlossen	355 m ³	unten	1, 3, 5, 7, 9, 11
Zustand II	geöffnet	448 m ³	unten	1 – 12
Zustand III	geöffnet	448 m ³	oben	1 – 12, untere Dodekaederposition

4.3.3 Geometrie und Materialien

Der Sommersaal besitzt einen rechteckigen Grundriss mit einer Länge von 10,75 m und einer Breite von 5,80 m, das einer Grundrissfläche von ca. 65 m² entspricht. Der Fußboden besteht aus einer hohlliegenden Holzbalkendecke mit wärmedämmender Füllung auf einem Zwischenboden [Ten 02], deren Oberseite durch versiegelte Dielen abgeschlossen ist. Die Wände bestehen aus Mauerwerk und sind innenseitig mit Styropor verkleidet. In Anlehnung an den historischen Raumzustand wurde auf Heizkörper verzichtet und eine Wandheizung integriert. Auf dem Styropor ist ein Kalkputz aufgetragen, der im unteren Bereich bis zu einer Höhe von 60 cm mit einem Lackanstrich und darüber mit einem Farbanstrich versehen ist [sch 04/3]. An beiden Längsseiten befinden sich in nischenförmigen Vertiefungen auf der gesamten Länge hohe Doppelfenster mit einer Holzrahmung. In den Querwänden sind jeweils zwei schwere Holztüren angeordnet.

In einer Höhe von etwa 3,80 m befindet sich ein umlaufendes Kranzgesims, von dessen Oberseite sich die Decke ellipsenförmig in Richtung Raummitte wölbt (Abb. 4.15). Der untere, klein strukturierte Teil des Gesimsbandes besteht aus Holzleisten, während der obere Teil aus Stuck gefertigt wurde. Der gewölbte Teil der Decke wurde durch eine verputzte Verbretterung auf einem tragenden Holzgerüst herausgearbeitet, so dass über der Wölbung ein Hohlraum entstand. Der flache Deckenbereich ist Teil der Holzbalkendecke der oberen Schallkammer, dessen Verbretterung in Richtung des Sommersaales ebenfalls mit einem Kalkputz versehen ist. Hinter der Wölbung und in den Zwischenräumen der Holzbalkendecke ist ein Dämmstoff eingelegt [sch 04/3].

Die maximale Raumhöhe des unteren Saales beträgt 5,30 m, so dass sich ein Raum-Volumen von etwa 355 m³ ergibt. Die Deckenöffnung ist zentral über der Raummitte angebracht und mit umlaufenden Stuckarbeiten verziert. Die Öffnung ergibt sich aus einem 2,75 m langen geraden Abschnitt, an dem in Richtung der Querwände jeweils ein Halbkreis mit einem Radius von 1,42 m anschließt. Damit beträgt die Fläche der Deckenöffnung 14,14 m², was einer Kopplungsfläche in Bezug zur Grundfläche des Saales von 22 % entspricht.

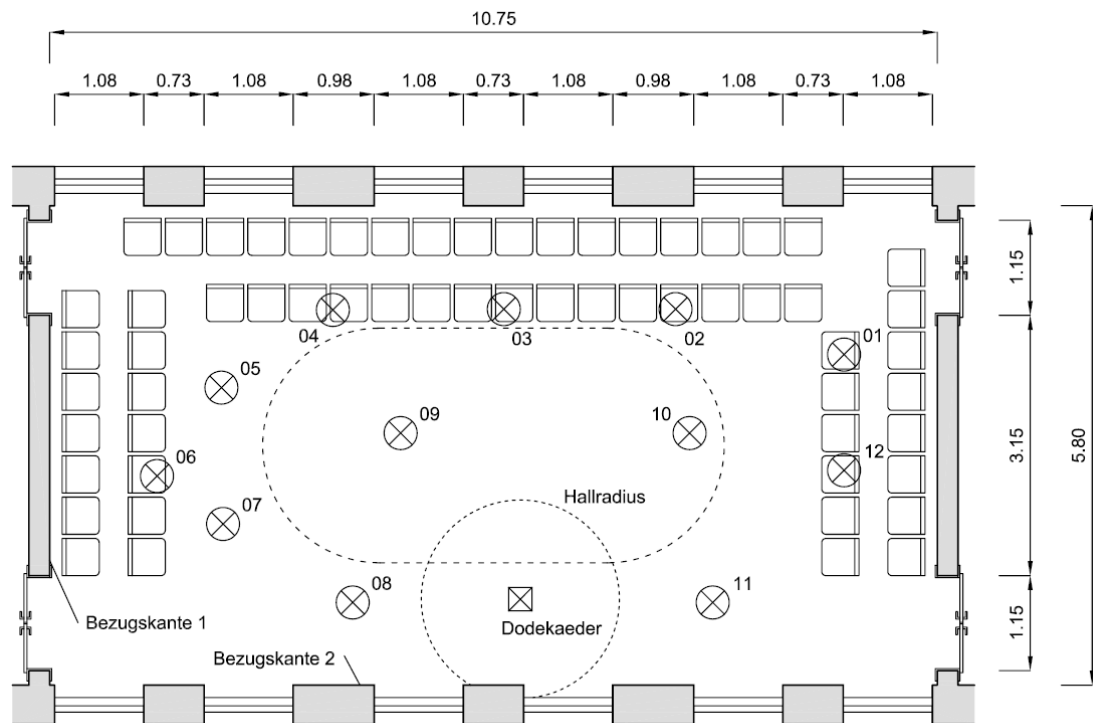


Abb. 4.12: Grundriss des Sommersaales im Bosehaus mit Lage der Messpositionen

Die Musikempore besitzt mit Seitenlängen von 10,95 m und 4,30 m ebenfalls einen rechteckigen Grundriss. Der Fußboden ist mit einfachen, glatten Brettern verschlagen und wurde auf Grund der geringen Höhe des Raumes von 1,75 m zwischen den Querwänden und dem Deckenauge um 15 cm abgesenkt (Abb. 4.15). Da sich die Schallkammer im Dachgeschoss befindet, handelt es sich bei den Längswänden um die Verkleidung des Dachtragwerkes. Entlang der Wände ist ein 90 cm hoher Drempel nach historischer Vorlage angeordnet. Dafür wurden HWL-Platten an einem Holzrahmen befestigt und raumseitig mit rot gefärbten Holzplatten verkleidet (Abb. 4.14) und der entstandene Zwickel vollständig mit Mineralwolle hinterfüllt [sch 04/3]. Der restliche Wandbereich, die 3 Fensternischen auf beiden Raumseiten sowie der gesamte Deckenbereich wurden mit Gipskartonplatten verkleidet, die mit einem blauen, leinenartigen, sehr leichten und offenporigen Stoff (Rupfen) bespannt sind (Abb. 4.11). Die Zwischenräume hinter den Gipskartonplatten wurden ebenfalls mit Mineralwolle ausgefüllt.

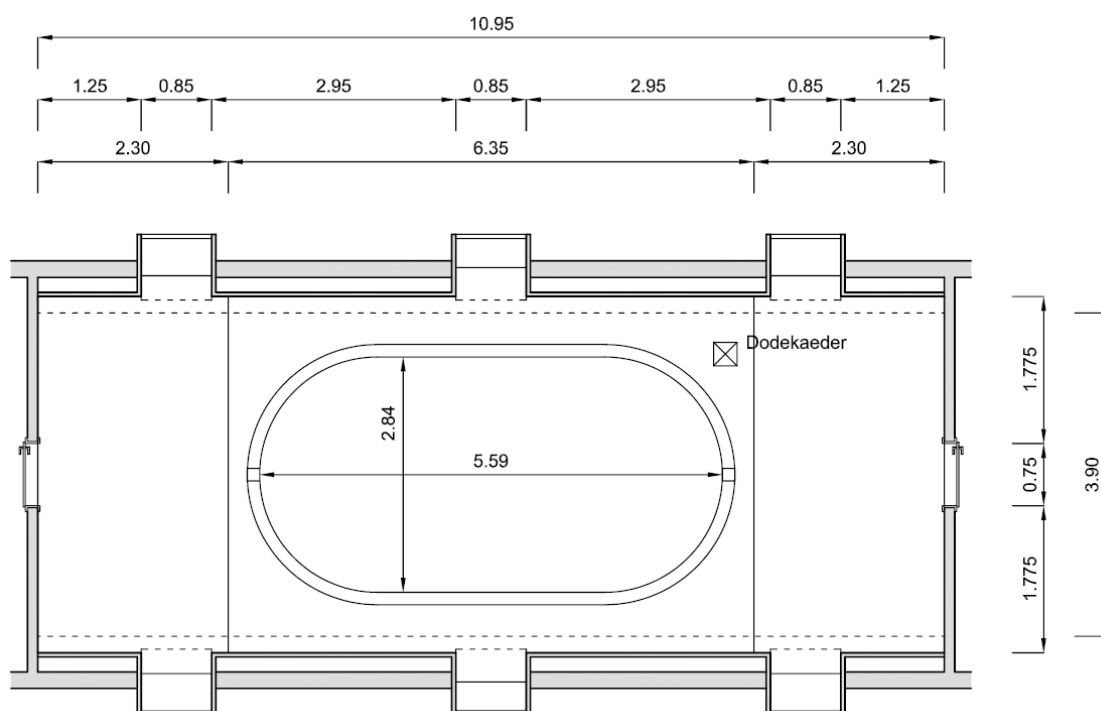


Abb. 4.13: Grundriss des Galeriegeschosses über dem Sommersaal mit Lage der Messposition

Die 6 Fenster in den Längswänden bestehen ausschließlich aus einer einfachen Glasscheibe in einem schmalen Holzrahmen. An den Querwänden wurde der Aufbau der Längswände weitergeführt, bis auf den Unterschied, dass sich hinter den Holzplatten keine Zwickel befinden [sch 04/3]. Die Brüstung der Deckenöffnung bildet ein 80 cm hohes, akustisch transparentes Holzgeländer mit flachen Balustern.

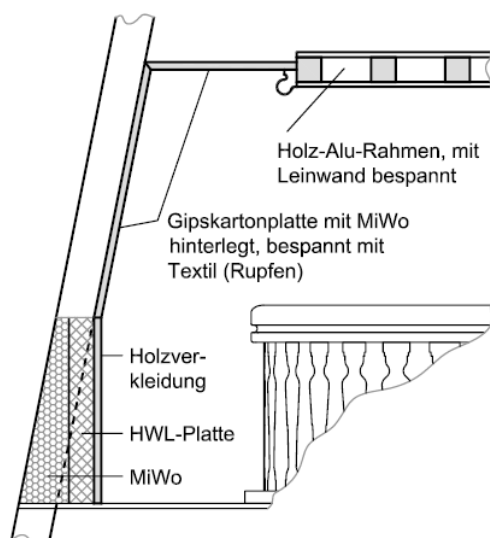


Abb. 4.14: Konstruktive Ausbildung der Längswände der Musikerempore

Der vertikal bewegliche Deckenplafond besteht aus einem leichten Holz-Aluminium Rahmensystem, auf das die Leinwand mit einem Gemälde aufgespannt wurde. Auf der Rückseite ist der Rahmen durch einen weiteren Stoffbezug verschlossen, so dass es sich insgesamt um ein leichtes, akustisch teilweise transparentes System handelt (Abb. 4.14). Das Gesamtvolumen der Schallkammer beträgt inklusive der 6 Fensterinseln ca. 93 m^3 , das 26% des Gesamtvolumens des unteren Saales entspricht.

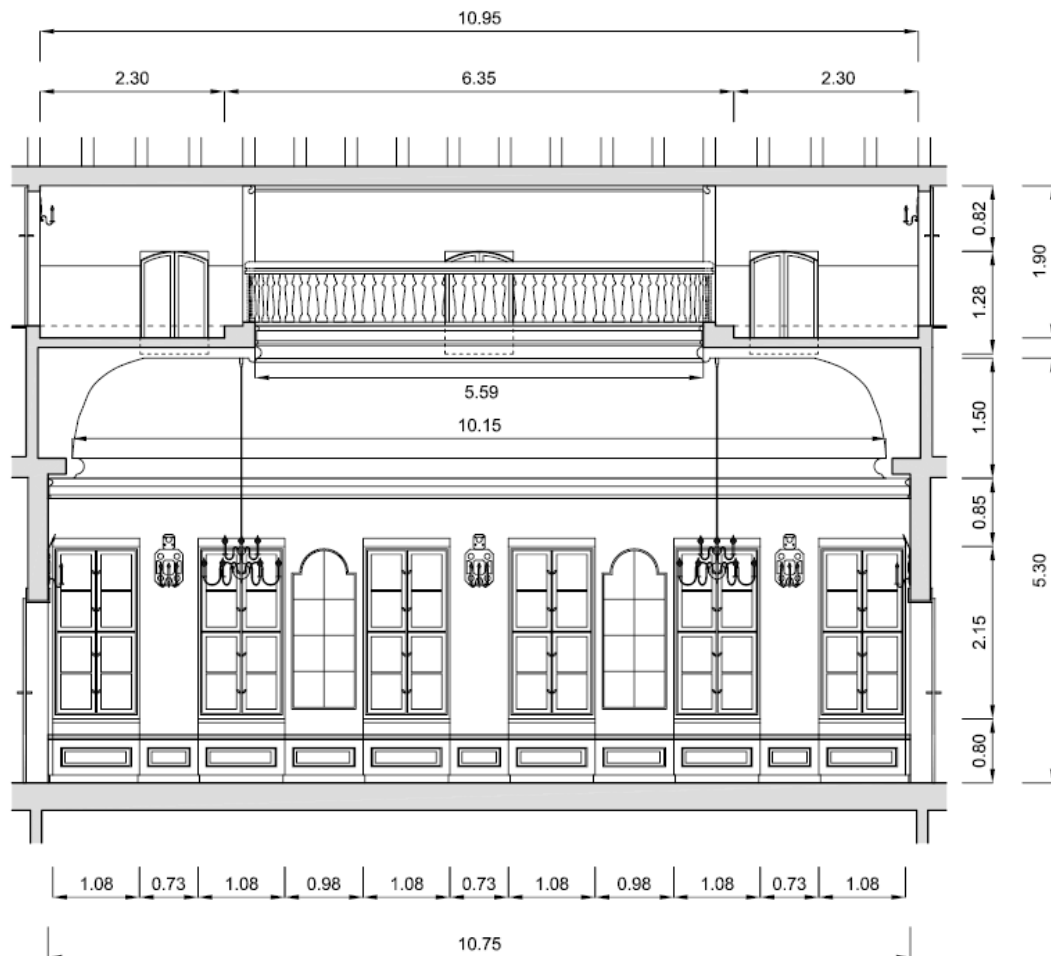


Abb. 4.15: Längsschnitt des Sommersaales

Während der Messdurchführung waren auch akustisch wirksame Einrichtungsgegenstände vorhanden. Im unteren Saal befanden sich zwischen den Fenstern der Längswände 4 großflächige, nach historischen Herstellungsverfahren angefertigte Spiegel mit einer Einzelfläche von ca. $1,50 \text{ m}^2$. Des weiteren war das zu dem Saal gehörige Konzertgestühl von 60 leicht gepolsterten Stühlen vorhanden, wodurch die vorrangig vom Publikum besetzte Fläche gekennzeichnet wurde. Die Anordnung des Gestühls kann dem Grundriss der Abb. 4.12 entnommen werden.

4.3.4 Rechenmodell

Aus dem während der Messung angefertigten Aufmaß sowie aus vorliegenden Bauplänen [Ten 02] sind die Grundrisse und Schnitte entstanden, die auszugsweise in Abb. 4.12 bis Abb. 4.15 und detailliert im Anhang unter E.5 “Referenzobjekt Sommersaal im Bosehaus“ angegeben sind. Die Geometrie des Raumes kann in dem verwendeten Simulationsprogramm ausschließlich über eine Textdatei eingegeben werden. Dafür müssen im ersten Schritt für jeden einzelnen Eckpunkt die drei Raumkoordinaten numerisch eingegeben werden und in einem weiteren Schritt werden aus mindestens 4 Koordinatenpunkten ebene Flächen aufgespannt, bis durch alle Flächen ein geschlossener Raum definiert ist. Da diese Eingabemethode bei einer komplexen Raumgeometrie schnell unübersichtlich werden kann, wurde zuvor ein dreidimensionales ComputermodeLL mit einem speziellen CAD-Programm erstellt. Aus diesem Modell konnten die Koordinaten einzelner Punkte wesentlich schneller abgefragt werden, wie es allein aus Grundrissen und Schnitten nicht möglich gewesen wäre. Zusätzlich konnten mit Hilfe des Modells einige räumliche Details geklärt werden, die aus den vorliegenden Grundrissen nicht erkenntlich waren und es war eine Volumenberechnung mit Berücksichtigung der Deckenwölbung möglich. Weiterhin erwies sich auch die visuelle Kontrolle der eingegebenen Raumdaten als nützlich. In Abb. 4.16 werden zwei Darstellungen des verwendeten CAD-Modells beispielhaft vorgestellt.

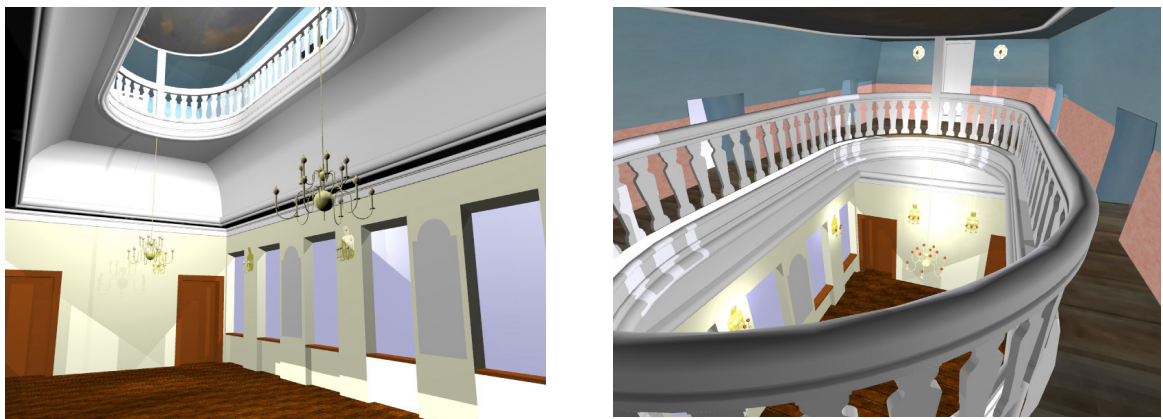


Abb. 4.16: 3D-CAD-Modell, links: Sicht in den Sommersaal mit geöffnetem Deckenplafond, rechts: Sicht von der Musikerempore durch die Deckenöffnung

Für die Übertragung von kreisförmigen Rundungen in das Berechnungsmodell war es ausreichend die Koordinaten in 30°-Schritten zu übernehmen. Das betrifft in dem Modell des Sommersaales die Öffnung in der Decke, das zugehörige Geländer sowie das bewegliche Deckengemälde. Für die untere Decke erschien es sinnvoll die Wölbung etwas genauer zu modellieren, da einerseits die Rundung elliptisch verläuft und andererseits die Deckenfläche einen relativ großen

prozentualen Anteil an der Raumbegrenzungsfläche des unteren Raumes einnimmt. Damit hat sie einen wesentlichen Einfluss auf die akustischen Eigenschaften, da sie häufiger von reflektierten Strahlen getroffen wird als kleinere Flächen. Die verwendeten Koordinaten der Deckenausrundung sind im Anhang E.5.3 “Längsschnitt Sommersaal“ angegeben.

Für das Berechnungsmodell des Sommersaales wurde eine relativ hohe Genauigkeit der Geometrie angestrebt. Im Gegensatz zur herkömmlichen Herangehensweise, Abmessungen unterhalb von 30 cm zu vernachlässigen (Kap. 4.2.4, S. 86, Abs. 1), wurden auch Flächen wie die Fensterbänke und zugehörige Fensterleibungen, Türrahmen sowie der grobe Verlauf des Gesimsbandes, in das Modell übernommen. Alle diese Strukturen könnten auch durch einfache ebene Flächen modelliert werden, denen ein angemessener Streugrad zugewiesen wird. Da die Wahl des Streugrades großen Einflüssen unterliegt, sollte diese Fehlerquelle bei der Simulation durch eine detailliertere Modellierung möglichst gering gehalten werden. Damit wird bei dem verwendeten Modell davon ausgegangen, dass die Unterschiede zwischen Mess- und Simulationsergebnissen überwiegend durch zwei Parametern verursacht werden – die Wahl der Absorptionswerte und das Simulationsverfahren.

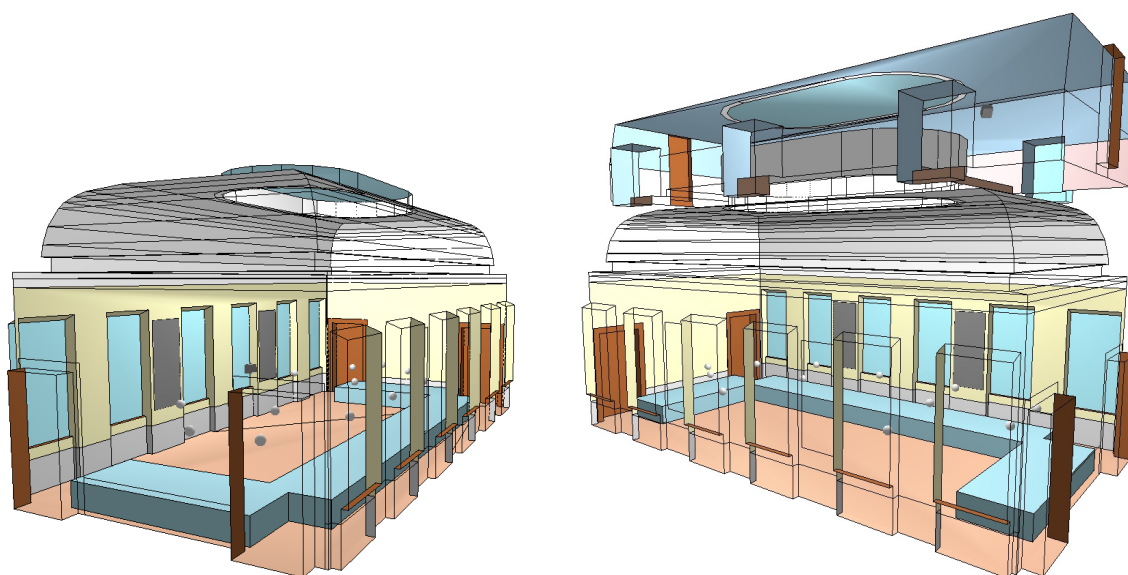


Abb. 4.17: Visualisiertes Berechnungsmodell, links: Zustand I – Deckenplafond geschlossen, rechts: Zustand III – angekoppelter Raum, Schallanregung von der Musikerempore

In dem Simulationsprogramm wird die “Blickrichtung“ einer Fläche, das heißt ihr Normalenvektor, durch die Reihenfolge der eingegebenen Eckpunkte definiert. Wird anschließend der Fläche ein Materialparameter zugewiesen, bezieht sich dieser nur auf die Normalenrichtung. Aus diesem Grund ist eine Fläche in dem Berechnungsmodell nur einseitig akustisch wirksam, während die andere Seite vollständig akustisch transparent ist. Um die Richtigkeit der Eingabeparameter zu

überprüfen, kann das Modell durch einen integrierten “Open-GL-viewer“ visuell überprüft werden. Dafür ordnet das Programm jedem Material eine Farbe zu, die wie die akustischen Eigenschaften nur auf einer Seite ausgegeben werden, so dass durch die rückwärtige Seite durch die Flächen in den modellierten Raum hineingesehen werden kann. Zur besseren Vorstellung der Raumgeometrie bleiben aber die Kanten der Flächen sichtbar. Für die akustische Simulation des Sommersaales wurden zwei verschiedene Geometriemodelle verwendet. Für den Zustand I mit verschlossenem Deckendurchbruch brauchte nur der untere Saalbereich berücksichtigt werden und für die Zustände II und III – mit geöffnetem Deckenplafond – wurde auch die Musikerempore in das Modell mit einbezogen. Beide visualisierten Modelle sind in Abb. 4.17 dargestellt.

Die während der Messung vorhandene Konzertbestuhlung, welche in Abb. 4.10 zu sehen ist, darf bei der Simulation nicht vernachlässigt werden, da eine lose Bestuhlung, genau wie ein anwesendes Publikum, das Schallfeld wesentlich beeinflusst [Mey 03, S.27] – einerseits durch ein hohes Absorptionsvermögen, aber auch durch die sehr hohe Diffusität infolge der stark strukturierten Gestaltung. In der Simulation kann eine Bestuhlung berücksichtigt werden, in dem an Stelle der mit Stühlen besetzten Fläche ein Block modelliert wird, der in die Fußbodenfläche zu integrieren ist (Abb. 4.17). Dies begünstigt nicht nur eine einfachere Modellierung, sondern es ist auch bei der Vergabe der Absorptions- und Diffusionseigenschaften von Vorteil, da zugehörige Werte vorwiegend für die von Publikum oder Gestühl besetzte Grundflächen angegeben werden.

4.3.5 Eingabeparameter

Auf Grund der Kenntnisse der verwendeten Materialien und der konstruktiven Durchbildung baulicher Details des Sommersaales, konnten den modellierten Oberflächen akustische Materialparameter zugewiesen werden. In der Fachliteratur sind Angaben zu einfallswinkelunabhängigen Absorptionswerten für diverse Materialien und Konstruktionen sehr reichhaltig vorhanden. Bei der Auswahl der Parameter für den Sommersaal wurde sich auf 3 Literaturquellen ([Bob 90], [Mey 03], [ptb 04]) beschränkt, wozu auch die Datenbank der Physikalisch-Technische Bundesanstalt gehört, in der Angaben aus zahlreichen Literaturquellen zusammengetragen und regelmäßig aktualisiert werden. In Tabelle 4.3 und Tabelle 4.4 sind die verwendeten Absorptionswerte getrennt nach Sommersaal und Musikerempore angegeben.

Tabelle 4.3: Verwendete Absorptionsgrade α , Sommersaal

Beschreibung Oktavmittelfrequenzen [Hz]	Oktavmittelfrequenzen [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
Dielenfußboden	0,15	0,12	0,10	0,07	0,06	0,06
Wandflächen, Styropor mit Heizelementen, Kalkputz, Farbanstrich	0,10	0,09	0,07	0,08	0,05	0,04
Doppelfenster	0,10	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02
Türblatt	0,14	0,10	0,07	0,08	0,09	0,10
Fensterbrett, Türrahmen	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,06
Spiegel	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03
Kranzgesims	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Gewölbter und ebener Deckenteil	0,15	0,10	0,07	0,07	0,07	0,08
Polstergestühl, unbesetzt (je Grundfläche)	0,40	0,50	0,60	0,61	0,59	0,55

Dem beweglichen Deckenplafond konnte wegen seiner Bauweise kein eindeutiger Wert zugewiesen werden, zumal sich für das heruntergefahrte Deckengemälde andere Absorptionswerte ergeben wie für den geöffneten Zustand. Der Grund dafür ist die akustisch transparente Konstruktion. Ist das Deckenauge verschlossen, dringt der Schall durch das Gemälde in die Musikerempore, so dass diese wie ein Resonanzkörper reagiert. Damit ist die Schallabsorption über dem gesamten Frequenzspektrum, besonders im tiefen Frequenzbereich, höher als im geöffneten Zustand. Dieser Effekt wurde durch Zuweisung von zwei verschiedenen Absorptionsgraden berücksichtigt.

Tabelle 4.4: Verwendete Absorptionsgrade α , Musikerempore

Beschreibung	Oktavmittelfrequenzen [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
Fußboden	0,15	0,12	0,10	0,07	0,06	0,06
Wand mit Holzverkleidung	0,08	0,09	0,10	0,21	0,28	0,32
Wand und Decke, Gipskartonplatten mit Textilbezug	0,14	0,10	0,08	0,07	0,10	0,12
Einfaches Holzfenster	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
Türblatt	0,14	0,10	0,07	0,08	0,09	0,10
Türrahmen	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,06
Stuck, Rahmen des Deckenbildes	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Geländer	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,07
Deckenplafond geschlossen	0,44	0,37	0,30	0,34	0,40	0,50
Deckenplafond geöffnet	0,10	0,15	0,30	0,33	0,32	0,20

Da in der Literatur nur bedingt Angaben zu den Streueigenschaften gebräuchlicher Baumaterialien gefunden werden konnten, wurden ausschließlich die 4 Abschätzwerte des Streugrades nach dem "CATT-Handbuch" verwendet (Tabelle 4.1). Den Decken der beiden Räume, einschließlich des Deckengemäldes, wurden schwach diffus reflektierende Eigenschaften großer Flächen zugewiesen und dem Kranzgesims sowie dem Geländer der Musikerempore eine hohe Diffusität. Für alle anderen Raumflächen wurde ein durchschnittlicher Streugrad angenommen. Die Stühle sind stark strukturiert und wirken deshalb enorm schallstreuend, weshalb der Bestuhlungsfläche der Streugrad eines Publikums zugeordnet wurde. In der Tabelle 4.5 sind die verwendeten Streugrade zusammengestellt.

Tabelle 4.5: Verwendete Streugrade s , Sommersaal und Musikerempore

Beschreibung	Oktavmittelfrequenzen [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
Untere und obere Decke, Deckengemälde	0,08	0,08	0,09	0,09	0,10	0,10
Aus Stuck gefertigte Gesimse, Emporengeländer	0,10	0,15	0,30	0,60	0,80	0,80
Konzertsbestuhlung	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80
Restliche Flächen des Modells	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20

Für akustisch transparente Konstruktionen besteht in dem Simulationsprogramm die Möglichkeit, einer Oberfläche einen Transmissionskoeffizienten t (transmission coefficient) zuzuweisen. Da die Schalltransmission einen Teil der Energieverluste bei der Absorption darstellt, darf die Summe von Transmission und Absorption nicht über hundert Prozent betragen. Außerdem müssen sich transparente Flächen innerhalb des Raumes befinden, da andernfalls das Programm keine Strahlenverfolgung durchführen kann. In dem Rechenmodell ist das Geländer als schalltransparent betrachtet worden. Da keine Anhaltswerte vorlagen, wurden die Transmissionsverluste über die Wellenlänge abgeschätzt. Dabei wurde davon ausgegangen, dass das Geländer ein um so größeres Hindernis für den Schall darstellt, je kleiner die Wellenlänge ist. Die verwendeten Werte können der Tabelle 4.6 entnommen werden.

Tabelle 4.6: Verwendeter Transmissionskoeffizient t , Musikerempore

Beschreibung	Oktavmittelfrequenzen [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
Geländer der Musikerempore	0,90	0,85	0,80	0,75	0,65	0,50

Eine weitere erforderliche Randbedingung für eine raumakustische Simulation stellt das Raumklima dar. Temperatur und Feuchtigkeitsgehalt der Luft beeinflussen zum einen deren Absorptionsverhalten (siehe E.2.2 “Dissipationsverluste an der Luftschicht“), zum andern ist die Schallgeschwindigkeit von der Temperatur des Ausbreitungsmediums abhängig (siehe E.1.3 “Schallgeschwindigkeit“). Damit beeinflusst sie die Zeit, in der die Reflexionen an einer Hörerposition eintreffen. Die während der Messdurchführung aufgezeichneten mittleren Werte sind in der Tabelle 4.7 zusammengefasst. Die Dichte wurde allerdings nicht ermittelt. Da sie keiner so starken Schwankung unterliegt, wie die Temperatur und die Feuchtigkeit, wurde der von dem Programm vorgegebene Standardwert beibehalten.

Tabelle 4.7: Raumklima im Sommersaal

Eigenschaften der Umgebungsluft			
Temperatur T	20,9	[°C]	
Luftfeuchtigkeit φ	42,5	[%]	
Dichte ρ	1,20	[kg/m ³]	

4.3.6 Vergleich der Schallfeldparameter

Um die Simulationsergebnisse mit den Messwerten vergleichen zu können, sind an den Standorten der Messgeräte imaginäre omni-direktionale Schallerreger und Empfängerpositionen definiert worden. In dem visualisierten Berechnungsmodell (Abb. 4.17) sind die Mikrofone als sphärische Kugeldetektoren und die Schallquellen als Würfel dargestellt. Vor dem Vergleich der raumakustischen Kriterien werden die Impulsantworten des Raumes an zwei ausgewählten Messpunkten mit den simulierten Echogrammen verglichen. Mit dieser Gegenüberstellung wird grafisch veranschaulicht, dass bei der Messung sowie bei der Simulation bei einer Sichtbeziehung zwischen Schallquelle und Messposition der Einfluss des Direktschalls überwiegt, während bei einer unterdrückten Sichtbeziehung erst in einer späteren Folge die ersten Reflexionen eintreffen.

Ausgewählt wurden die Messpositionen 1 und 8 für den Zustand III, wobei der 8. Messpunkt eine direkte Sichtbeziehung zur Schallquelle besitzt. In Abb. 4.18 ist zu erkennen, dass nach einer kurzen Verzögerung der Direktschall an der Hörerposition eintrifft, alle später folgenden Reflexionen energieärmer sind und der Energiegehalt mit der Zeit kontinuierlich abnimmt.

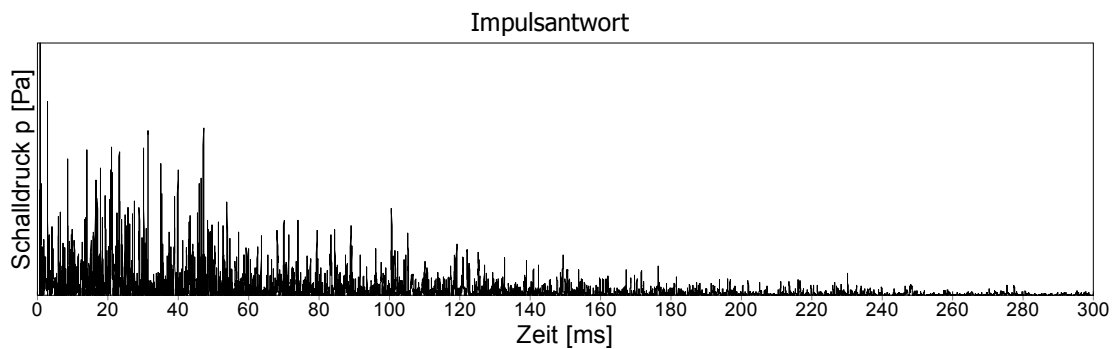


Abb. 4.18: Raumimpulsantwort des Raumes, Zustand III – Messposition 8

In Abb. 4.19 ist für die Messposition 8 das zugehörige Echogramm dargestellt. Im Gegensatz zur Raumimpulsantwort – der Verlaufskurve des über den gesamten Frequenzbereich quadrierten Schallwechseldrucks – wird in dem Echogramm für jeden an der Hörposition eintreffenden Strahl die Größe des Schalldruckpegels – repräsentativ für das Oktavband bei 1000 Hz – zum Zeitpunkt des Eintreffens notiert. Die beiden Graphen sind demnach nicht identisch, jedoch kann der allgemeine Verlauf des Schallereignisses verglichen werden. In dem Echogramm werden Direktschall und geometrische Reflexionen erster Ordnung durch blaue Linien hervorgehoben und der Direktschall durch einen Kreis markiert. Schwarze und rote Linien sind diffuse Schallrückwürfe sowie Reflexionen höherer Ordnung. Es ist gut zu erkennen, dass wie bei der gemessenen Raumimpulsantwort die Hörerposition durch Direktschall – gefolgt von Reflexionen erster Ordnung – versorgt wird. Die diffusen Schallreflexionen sind wesentlich energieärmer und die Reflexionen höherer Ordnung treffen in einer immer dichter werdenden Zeitfolge ein.

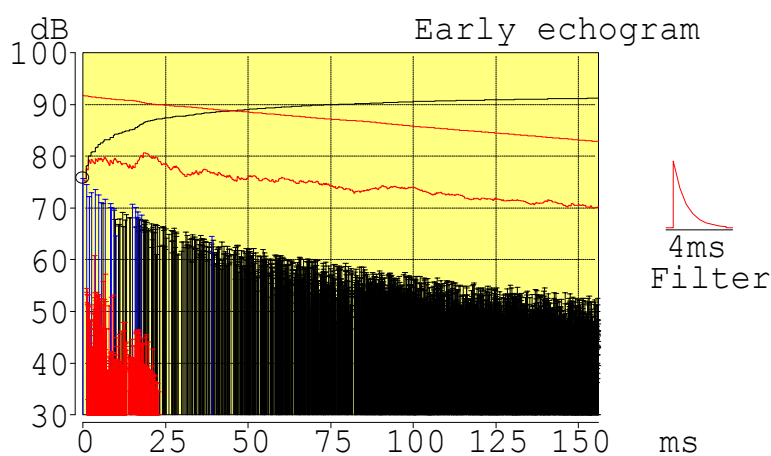


Abb. 4.19: Echogramm der Simulation, Zustand III, Messposition 8, 1000 Hz

Die durch die Decke abgeschirmte Messposition 1 kann nicht mit Direktschall versorgt werden, so dass der Schalldruck infolge diffuser Reflexionen nur allmählich zunimmt. Erst nachdem, nach entsprechender Laufzeit, die energiereichen geometrisch gerichteten Reflexionen eingetroffen sind, fällt der Schalldruck allmählich ab. Es ist zu beachten, dass die Darstellungen der Abb. 4.18 und Abb. 4.20 nicht in dem gleichen Maßstab abgebildet sind. An der Messposition 1 ist die einfallende Schallenergie wesentlich geringer als an der direktschallversorgten Messposition 8.

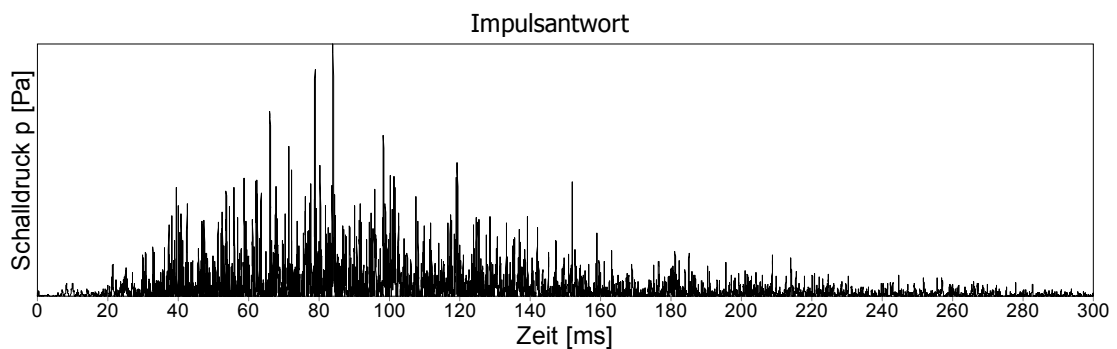


Abb. 4.20: Raumimpulsantwort des Raumes, Zustand III – Messposition 1

Der Effekt der abschattenden Wirkung durch die Decke wird auch in der Simulation deutlich. Auf Grund der unterdrückten Sichtbeziehung fehlt der Einfluss des Direktschalls vollständig. Die ersten an der Hörposition eintreffenden Schallanteile sind energiearme, diffuse Reflexionen und energiereiche, und damit für die Klangempfindung relevanten, geometrisch gerichteten Reflexionen erster Ordnung, erreichen die Hörposition nur in einer beschränkten Anzahl. Damit zeigt der Energieverlauf der simulierten Schallereignisse eine gute Übereinstimmung mit den aufgemessenen Schallfeldparametern. Wie hoch die Übereinstimmung der daraus abgeleiteten Bewertungskriterien ist, wird im Folgenden untersucht.

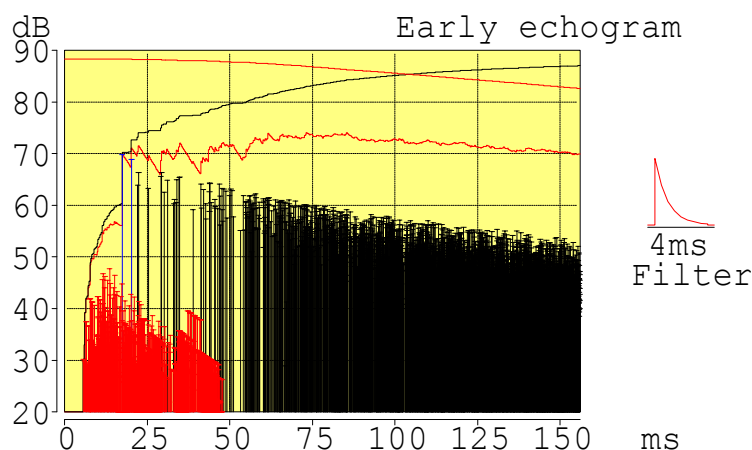


Abb. 4.21: Echogramm der Simulation, Zustand III, Messposition 1, 1000 Hz

4.3.7 Vergleich der Bewertungskriterien

Für einen prinzipiellen Vergleich zweier Räume hinsichtlich ihrer akustischen Eigenschaften ist es notwendig, die Bewertungskriterien in einer einfachen und knappen Form darzustellen. Obwohl die Energiekriterien eine starke Platzabhängigkeit aufweisen, wird zu diesem Zweck in der Literatur oft ein räumlicher Mittelwert gebildet [Ber 04]. Diesen erhält man durch eine arithmetische Mittelung nach DIN EN ISO 3382, das heißt über eine ausreichende Anzahl an repräsentativen Messpunkten. Ein so berechnetes Energiekriterium stellt aber nur eine Durchschnittsangabe des gesamten Raumes dar und es sollte demzufolge – für eine exakte Einordnung der Werte – zusätzlich die größte Abweichung von dem Mittelwert oder die Standardabweichung bekannt sein.

Auch die aufgemessenen und simulierten Bewertungskriterien der vorliegenden Arbeit werden mit dieser Methode verglichen. Vor der Untersuchung der einzelnen Messpunkte werden die räumlich gemittelten Energiekriterien sowie die gemittelte Nachhallzeit für mittlere Frequenzen T_{mid} vorgestellt.

Bei Angaben zu den Eigenschaften von Konzertsälen werden oft die Energiekriterien zusätzlich als Mittel über die Oktavbänder 500 Hz, 1000 Hz und 2000 Hz angegeben [Wei 02, S.249] und mit $D_{50}(3)$, $C_{80}(3)$, $G(3)$ und $T_S(3)$ bezeichnet. Damit die hier vorgestellten Ergebnisse mit anderen Literaturangaben vergleichbar bleiben, wird im Folgenden gleichermaßen verfahren. Dabei muss beachtet werden, dass die so erhaltenen Mittelwerte nicht mehr nach den Angaben der Optimalbereiche eingeordnet werden können, da sich diese lediglich auf das Oktavband von 1000 Hz beziehen. In Tabelle 4.8 sind die Werte für alle drei Messzustände zusammengefasst.

Tabelle 4.8: Vergleich zwischen Messung und Simulation anhand räumlich gemittelter Bewertungskriterien

	Zustand I		Zustand II		Zustand III	
	Messung	Simulation	Messung	Simulation	Messung	Simulation
T_{mid} [s]	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,1
$D_{50}(3)$ [%]	53,9	50,5	53,6	51,0	30,9	34,0
$C_{80}(3)$ [dB]	3,7	2,9	3,4	2,9	-0,3	0,4
$G(3)$ [dB]	17,8	20,6	17,4	20,2	14,2	16,0
$T_S(3)$ [ms]	69	74	70	73	106	99

Bei dem Vergleich der gemittelten Bewertungskriterien ist eine sehr hohe Übereinstimmung der mittleren Nachhallzeit zu erkennen, aber auch die über den Raum gemittelten Energiekriterien weichen nur in einem geringen Maß voneinander ab. Die subjektive Wahrnehmungsschwelle (Kap. 4.1.4 “Deutlichkeit“ ff) einer Veränderung des Deutlichkeitsgrades von 5 % wird bei allen drei Messzuständen nicht unterschritten, wie auch die Werte der simulierten Schwerpunktzeit in allen Messzuständen nur sehr gering voneinander abweichen. Die Werte des Klarheitsmaßes unterschreiten die Schwelle für eine gerade wahrnehmbare Veränderung von 0,5 dB nur im ersten und dritten Messzustand. Die allgemeine Tendenz einer stärkeren Durchmischung des Schalls bei einer Schallanregung von der Musikerempore – und der damit verbundenen Verringerung der Klarheit und Durchsichtigkeit musikalischer Strukturen – wird allerdings richtig beschrieben. Bei dem Stärkemaß sind die Abweichungen etwas größer. Die Wahrnehmungsschwelle von 1 dB wird um 1 bis 2 dB überschritten, es ist aber auch hier die allgemeine Tendenz einer Lautstärkeverringerung im Zustand III gegenüber den beiden anderen Messzuständen zu erkennen. Die simulierten objektiven Kriterien weisen damit eine hohe Übereinstimmung mit den aus den Messungen abgeleiteten Kriterien auf, dass heißt, mit dem modellierten Raum wird die gleiche subjektive Wahrnehmung der akustischen Verhältnisse beschrieben, zumindest was die über den Raum gemittelten – und damit statistischen – Bewertungskriterien betrifft.

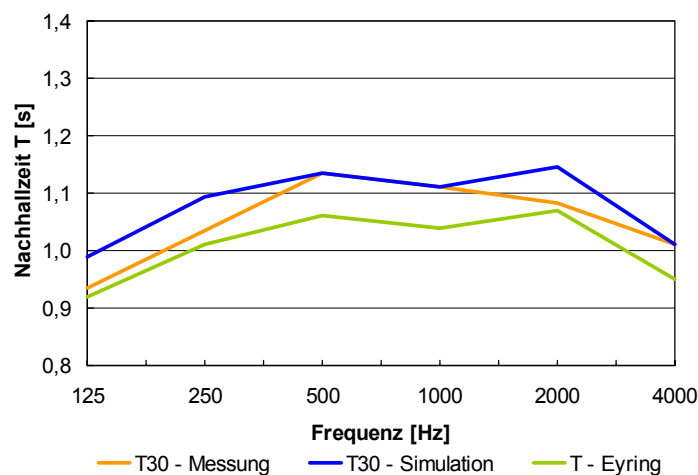


Abb. 4.22: Sommersaal, Zustand I: Vergleich zwischen Messung und Simulation, Nachhallzeit T_{30}

In Abb. 4.22 und Abb. 4.23 wird der spektrale Verlauf der simulierten und der aufgemessenen Nachhallzeiten T_{30} miteinander verglichen. Zusätzlich ist die Eyring’sche Nachhallkurve dargestellt. Da sie als statistisches Kriterium lediglich von der Gesamtabsorptionsfläche A_{ges} und dem Raumvolumen abhängig ist, ergibt sich für den Zustand II und Zustand III ein identischer Verlauf.

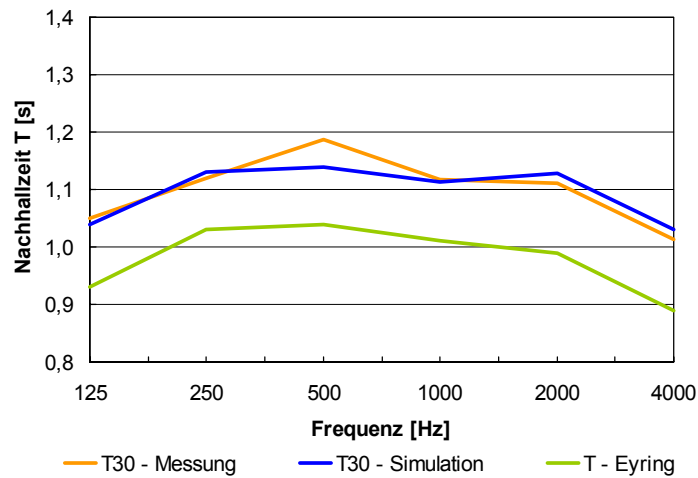


Abb. 4.23: Sommersaal, Zustand II: Vergleich zwischen Messung und Simulation, Nachhallzeit T_{30}

In allen drei Abbildungen, die alle drei Messzustände beschreiben, ist gut zu erkennen, dass nicht nur die mittleren simulierten Nachhallzeiten mit den Gemessenen korrelieren, sondern auch deren Abweichungen im gesamten untersuchten Frequenzspektrum kleiner als eine zehntel Sekunde sind, was einer gerade wahrnehmbaren Änderung der Nachhallzeit entspricht [Mey 03, S.47]. Des weiteren wird die Zunahme der Abweichung der statistisch begründeten Nachhallzeit nach Eyring von den Messwerten bei geöffnetem Deckenplafond deutlich. Dies resultiert aus der Gültigkeit der Formel ausschließlich für einfache Raumgeometrien (Kap. 4.1.1, S.66, Abs.3).

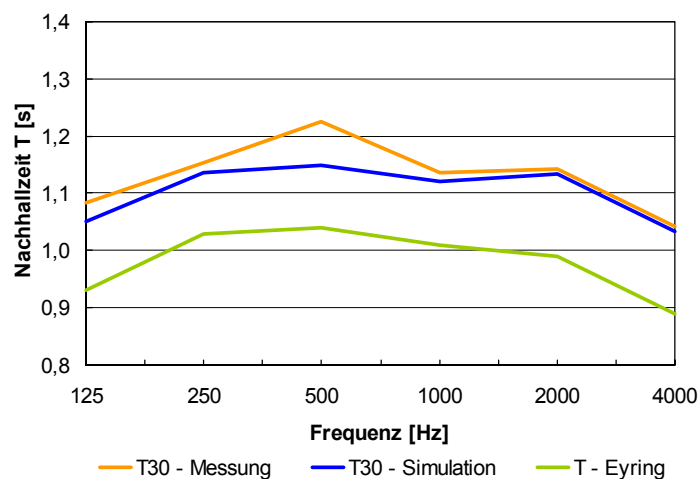


Abb. 4.24: Sommersaal, Zustand III: Vergleich zwischen Messung und Simulation, Nachhallzeit T_{30}

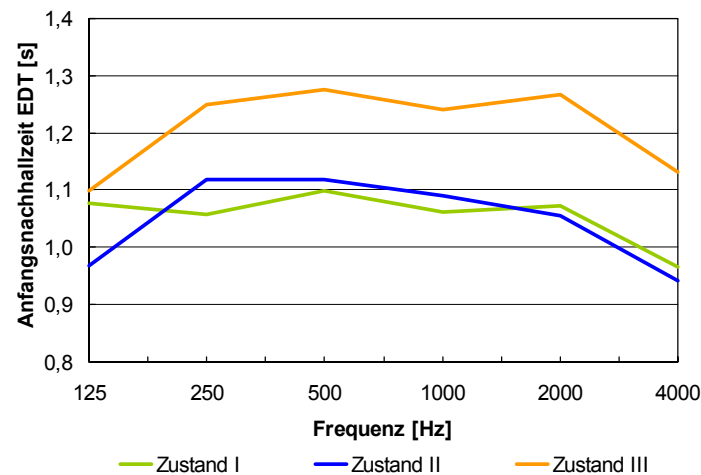


Abb. 4.25: Sommersaal, WinMLS-Messung, 3 Messzustände, Anfangsnachhallzeit EDT

Eine Beschreibung der Halligkeit mittels der Anfangsnachhallzeit kommt dem subjektiven Eindruck näher als die Darstellung der Nachhallzeit T_{30} (Kap. 4.1.1, S.68, Abs.3), auf Grund dessen die Übereinstimmung simulierter und gemessener Werte überprüft wird. In Abb. 4.25, in der die messtechnisch ermittelten Werte bei allen drei Zuständen dargestellt sind, ist zu erkennen, dass sich die Anfangsnachhallzeit anders verhält als die Nachhallzeit bezogen auf einen Pegelabfall von 60 dB. Bei einer Schallanregung in der Musikerempore ist der anfängliche Pegelabfall deutlich flacher als bei einer Schallanregung im unteren Saalbereich. Ob die Decke geöffnet oder verschlossen ist, hat keine große Auswirkung auf den anfänglichen Pegelabfall. Im Vergleich mit Abb. 4.26 wird die gute Übereinstimmung zwischen den simulierten und gemessenen Anfangsnachhallzeiten deutlich.

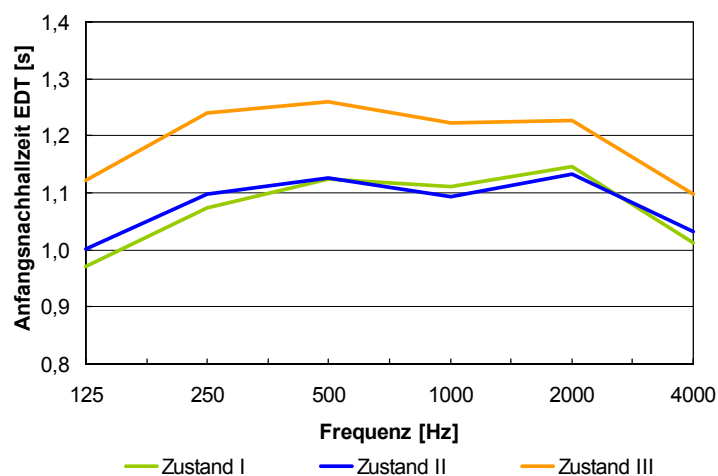


Abb. 4.26: Sommersaal, CATT-Simulation, 3 Messzustände, Anfangsnachhallzeit EDT

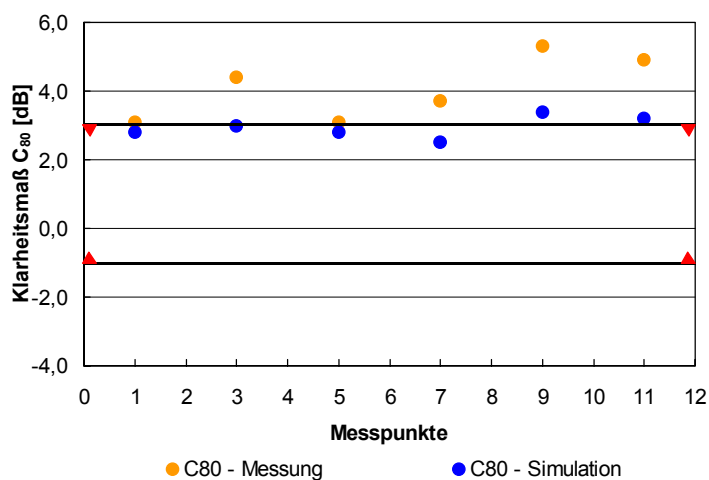


Abb. 4.27: Sommersaal, Zustand I: Vergleich zwischen Messung und Simulation, Klarheitsmaß C_{80}

Um die einzelnen Platzbereiche genauer zu untersuchen, wurden zusätzlich die simulierten und die aus der Messung abgeleiteten Energiekriterien an den einzelnen Messpunkten gegenübergestellt. An dieser Stelle wird exemplarisch für alle Energiekriterien das Klarheitsmaß an allen Messpunkten untersucht, da der Raum für musikalische Darbietungen ausgelegt ist. Der in Abb. 4.27 bis Abb. 4.29 durch rote Pfeile markierte Bereich grenzt dabei den optimalen Bereich für das Klarheitsmaß nach [Fas 98, S.151] für Konzertsäle ein.

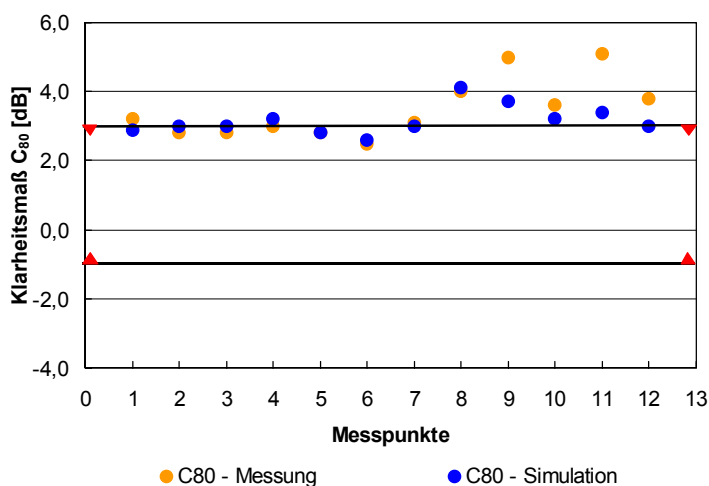


Abb. 4.28: Sommersaal, Zustand II: Vergleich zwischen Messung und Simulation, Klarheitsmaß C_{80}

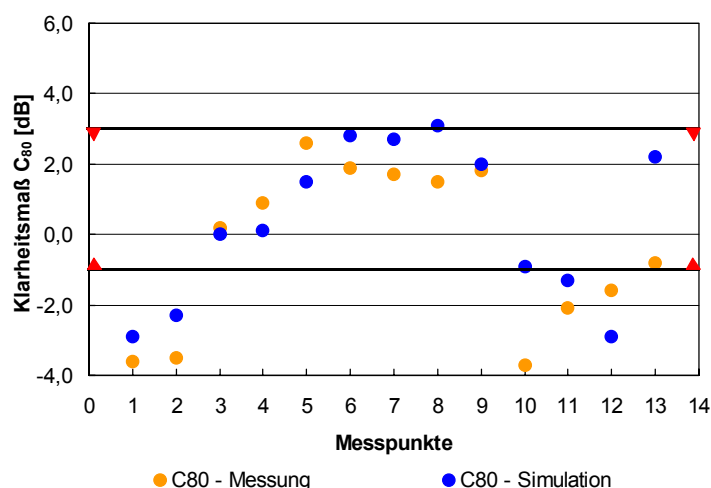


Abb. 4.29: Sommersaal, Zustand III: Vergleich zwischen Messung und Simulation, Klarheitsmaß C_{80}

Es fällt auf, dass die simulierten Werte des Klarheitsmaßes für den Zustand I (Abb. 4.27) mit geschlossenem Deckenplafond wesentlich stärker von den gemessenen Werten abweichen als für den Zustand II (Abb. 4.28) mit geöffneter Decke. Der Grund dafür könnte in dem gewählten Absorptionswert für das Deckengemälde liegen, der nicht anhand einer Literaturangabe festgelegt, sondern auf Grund der Plafondkonstruktion abgeschätzt wurde. Ist das Deckenbild geöffnet, ist eine sehr gute Übereinstimmung simulierter und gemessener Werte zu erkennen. Lediglich in einzelnen Messpunkten kommt es zu einer größeren Abweichung von bis zu 2 dB. Wird von der Musikerempore aus der Raum angeregt (Abb. 4.29), ist die Streuung um die Messwerte etwas größer, jedoch befinden sich die Abweichungen größtenteils noch innerhalb der Wahrnehmungsschwelle. Die beiden „Ausreißer“ der Messpunkte 10 und 13 mit einer Abweichung von bis zu 3 dB resultieren vermutlich aus simulationsbedingten Verfahren, da die Abstrahlung der Schallteilchen und deren Richtungsverteilung nach diffusen Reflexionen zufallsgesteuert ist.

Auf Grund der großen Datenmenge, die sich aus Messung und Simulation der drei Raumzustände ergibt, werden die numerischen und graphischen Angaben der übrigen Energiekriterien in E.7 „Daten – CD“ vollständig dargestellt. Diese verhalten sich ähnlich wie das Klarheitsmaß. Die größte Übereinstimmung mit den Messwerten konnte im Zustand II festgestellt werden, während bei geschlossener Deckenöffnung etwas größere Abweichung auftreten und die Abweichung der Messpunkte 10 und 13 im Zustand III sind im Vergleich zu den anderen Messpunkten ebenfalls wesentlich höher. Insgesamt wird aber festgestellt, dass bei einer hinreichend genauen Kenntnis der Materialparameter mit einem auf Strahlenverfolgung basierenden Simulationsprogramm auch das Schallfeld eines gekoppelten Raumsystems ausreichend genau beschrieben werden kann und die simulierten Bewertungskriterien gut mit den aus Messungen abgeleiteten Kriterien korrelieren. Obgleich gewisse Abweichungen erkenntlich sind, kann die allgemeine Tendenz der Bewertungsgrößen sehr gut abgelesen und bewertet werden.

5 Raumakustische Untersuchung der Schlosskapelle

Die Entwicklung der geometrischen Struktur des Berechnungsmodells der “Himmelsburg“ baut auf den Erkenntnissen der architektonischen Rekonstruktion auf. Die Vorgehensweise bei der Umsetzung wird zu Beginn dieses Kapitells erläutert. Für die historischen Baukonstruktionen und verwendeten Materialien werden entsprechende Materialparameter nach Vorgaben aus der Fachliteratur ausgewählt. In einem weiteren Modellierungsprozess werden jeder Fläche des Berechnungsmodells die zugehörigen Materialeigenschaften zugewiesen sowie die Randbedingungen der Simulation festgelegt. Die Wahl der einzelnen Messpositionen, besonders die Schallquellenstandorte, erfolgen in Bezug zu den beiden Funktionen der Schlosskapelle als Raum zum Abhalten der Predigt sowie für musikalische Veranstaltungen.

Vor der Durchführung der Simulation werden aus der Primärstruktur sowie aus der Verbindung zur Sekundärstruktur des Raumes Rückschlüsse auf die akustische Qualität verschiedener Platzbereich gezogen und zu erwartende Tendenzen der Simulation abgeschätzt. Auf diese Weise ist es möglich, die Simulationsergebnisse prinzipiell auf ihren Wahrheitsgehalt einzuschätzen.

Bei der Auswertung der Simulationsergebnisse wird auf die jeweiligen Nutzungsansprüche bei den verschiedenen Veranstaltungen eingegangen und somit die Eignung des Raumes für Sprach- sowie Musikdarbietungen differenziert beurteilt. Durch einen Vergleich der “Himmelsburg“ mit barocken Kirchen, die auf Bachs Wirken einen bedeutenden Einfluss ausübten, wird die musikgeschichtliche Bedeutung dieser Schlosskapelle charakterisiert sowie eine Einordnung in Bezug zu dem baustiltypischen Bereich der akustischen Bewertungskriterien vorgenommen.

5.1 Rechenmodell

Vor der Implementierung der “Himmelsburg” in das Simulationsprogramm wurde die Geometrie, wie schon bei dem Referenzobjekt, in ein 3D-CAD-Modell übertragen. So war eine exakte Volumenberechnung möglich, räumliche Details konnten geklärt werden und anschließende eine schrittweise Vereinfachung der Geometrie für die Übertragung in das Simulationsmodell vorgenommen werden.

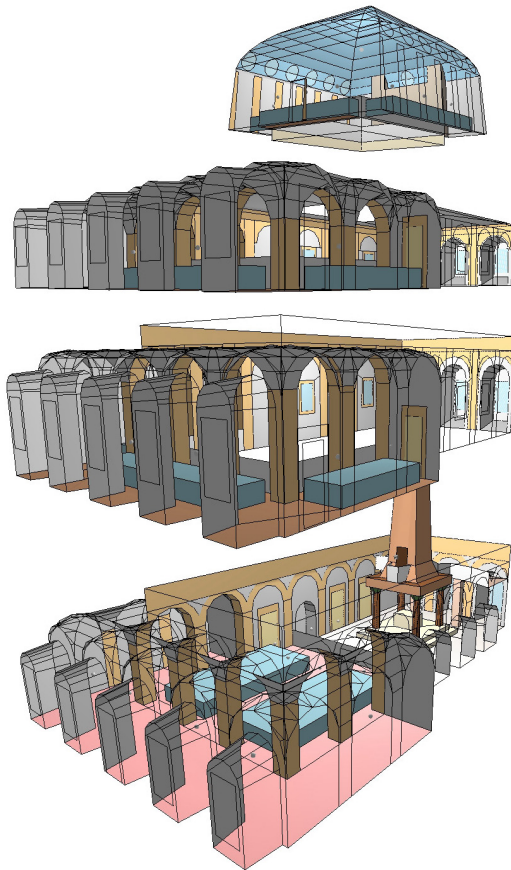
Das endgültige Simulationsmodell des vollständigen Kapellenraumes setzt sich aus 2930 Knotenpunkten und ca. 2000 Flächen zusammen. Das entspricht im Vergleich zu gebräuchlichen akustischen Simulationsmodellen einer sehr hohen Detailauflösung [Wie 02, S.145]. Für die “Himmelsburg” resultiert die große Anzahl an Flächen und Knoten aus den vielen Rundungen in den Wandflächen und Nischen, der detaillierten Übernahme von Einrichtungsgegenständen (Kanzelaltar, Altarempore, Orgel) sowie dem aufwendig beschriebenen Verlauf der Gewölbeflächen. Das eingeschlossene Volumen des Kirchenraumes (Erdgeschoss und beide Obergeschosse) ergibt sich in dem Modell zu 4237 m³ und der Kapellenraum besitzt ein Raumvolumen von 492 m³, das in etwa 12 % des Kirchenraumes entspricht. Die Kopplungsfläche der “Capella” ergibt mit 45,50 m² 16 % der Gesamtgrundfläche des Erdgeschosses von 293 m² (ohne die Fläche unter den Emporen ca. 200 m²).

5.1.1 Geometrie

Für die Übertragung der Geometrie in das Simulationsmodell wurden alle Rundungen durch Polygone in 30°-Schritten angenähert. Schwieriger gestaltete sich allerdings die Modellierung der Gewölbeflächen, da sich einerseits jeweils zwei senkrecht durchdringende Gewölbehälften in den selben Knotenpunkten treffen mussten und andererseits die Gewölbe mit den Wandflächen zu verbinden waren. Im Wandbereich wurde aus diesem Grund die Annäherung in 30°-Schritten übernommen, so dass ein Viertel-Segment eines Kreuzgratgewölbes durch 14 Flächen angenähert werden konnte, wobei im Randbereich sehr kleine Flächenelemente entstanden.

Fein strukturierte Elemente und Details wurden vereinfacht als ebene Flächen mit einem entsprechenden Streugrad s in das Modell übertragen. Dies betrifft die Kapitelle und Verzierungen der Pilaster und Pfeiler, die umlaufenden Gesimsbänder und die Türrahmen sowie in den Obergeschossen die aufwendig verzierten Rahmen der Fenster in den Querwänden, inklusive der beiden Blindfenster. Die Nischen der Außenfenster sind auf Grund einer Tiefe von ca. 1,40 m

exakt in das Modell übernommen worden. Zugunsten einer besseren Übersichtlichkeit und Verwaltung der einzelnen Flächen wurde das Modell geschossweise modelliert. Die so nacheinander entstandenen Modellbereiche sind in Abb. 5.1 dargestellt.



Die kuppelförmige Überdachung der “Capella“ beeinflusst das akustische Klangbild, insbesondere bei musikalischen Vorträgen von der Musikerempore, da ihre Neigung die Richtung der Reflexionen bestimmt. Aus diesem Grund wurde sie so genau wie möglich nach den Vorgaben der architektonischen Rekonstruktion [Sch 04/1] modelliert. Da es sich um einen ellipsenförmigen Querschnitt handelt, wurde die Rundung nicht durch einen pauschalen Winkel approximiert, sondern die Knotenpunkte in Abhängigkeit der Steigung festgelegt. Die verwendeten Koordinaten der Kuppelausrundung sind in E.6 “Himmelsburg“ tabellarisch angegeben.

Abb. 5.1: Visualisiertes Berechnungsmodell:
Explosionsdarstellung der einzelnen
Geschosse

Ein weiteres akustisch relevantes Element der “Capella“ ist die Orgel, deren grobe Abmessungen ebenfalls in dem Berechnungsmodell berücksichtigt wurden. Auf eine exakte Darstellung der runden Fensterischen in der Dachkuppel ist allerdings auf Grund der geringen Tiefe von 30 cm verzichtet worden. Um deren Auswirkung auf die Akustik zu berücksichtigen, wurden die Fensterflächen mit dem Streugrad s und dem Kantenbeugungskoeffizienten e beaufschlagt.

Die vom Publikum sowie von den vortragenden Musikern besetzten Flächen werden – wie schon bei dem Referenzobjekt im Bacharchiv – durch kubische Blöcke simuliert. Allerdings ist nicht nachweisbar, ob die Bestuhlung fest installiert war oder zeitweise in benachbarten Räumen verstaут worden ist (Kap. 3.2.7, S. 60, Abs. 2). Die akustische Situation der “Himmelsburg“ wird aus diesem Grund für drei prinzipiell verschiedene Raumzustände untersucht. Im Zustand I wird keine Bestuhlung berücksichtigt und damit die Akustik für den Kirchenraum untersucht, wie er in der historischen Quelle – dem Richter’schen Gemälde (Abb. 3.14) – dargestellt ist. Im zweiten

Zustand werden im Erdgeschoss hölzerne Kirchenbänke mit einer hohen Rückenlehne und auf den Emporen der Obergeschosse einfache ungepolsterte Stühle angenommen (Kap. 3.2.7, S. 60, Abs. 3). Damit wird auf die Akustik bei Musikproben eingegangen. Im dritten Zustand wird die Durchführung des Gottesdienstes mit Predigt und Orgelspiel in der “Capella” simuliert, wobei von einer vollständig besetzten Bestuhlung ausgegangen wird. In der Tabelle 5.1 sind die drei untersuchten Raumzustände zusammengefasst.

Tabelle 5.1: Untersuchte Raumzustände der “Himmelsburg“

Zustand	Beschreibung
Zustand I	Leerer Kirchenraum ohne eine vorhandene Bestuhlung
Zustand II	Angenommene Bestuhlung ist vorhanden, aber unbesetzt - Zustand einer Musikprobe
Zustand III	Angenommene Bestuhlung ist voll besetzt - Zustand für Predigt und musikalische Vorträge

Bei der Anordnung der Publikumsflächen wurde auf die architektonische Rekonstruktion zurückgegriffen sowie eigene Annahmen getroffen. Im Erdgeschoss sind lediglich die Kirchenbänke nach Scharfe [Sch 04/1] für das “gewöhnliche” Kirchenvolk in die Untersuchung mit eingeflossen, ein mögliches Publikum unterhalb der Emporen oder ein Sängerkhor im Chorbereich vor dem Altar wurde nicht berücksichtigt. Die Abmessungen der angenommenen Besetzungsflächen werden in Abb. 5.2 bis Abb. 5.5 verdeutlicht, in dem jedes Geschoss einzeln dargestellt und die besetzte Fläche farblich hervorgehoben wird.

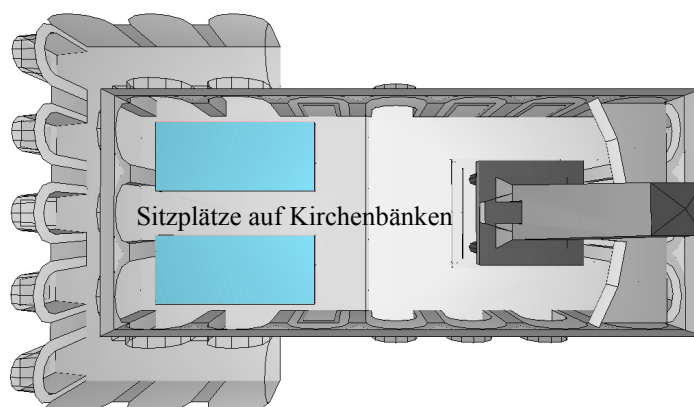


Abb. 5.2: Sitzplatzbereich im Erdgeschoss

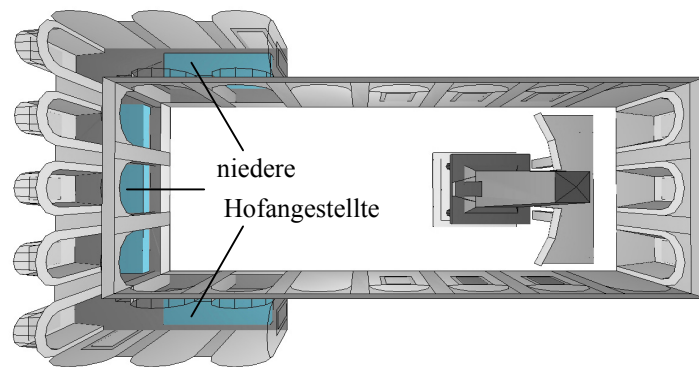


Abb. 5.3: Sitzplatzbereich im 1. Obergeschoss

Die Emporen dienten auch in protestantischen Kirchen zur Trennung der gesellschaftlichen Stände (Kap. 2.4.2, S. 34, Abs. 3). Aus diesem Grund wird in den Obergeschossen von einer einfachen Bestuhlung mit niedriger Besetzungsdichte ausgegangen. Aber nicht nur eine räumliche Trennung, sondern auch eine hierarchische Ordnung der Stände sollte durch die Emporen ermöglicht werden. Unter diesem Aspekt wird davon ausgegangen, dass im ersten Obergeschoss die niederen Hofangestellten platziert wurden, während das zweite Obergeschoss der Fürstlichen Familie und den hohen Hofangestellten vorbehalten war (Abb. 5.2, Abb. 5.3). Der Sitz des Herzogs befand sich zentral mit Blick auf den Altar und die Deckenöffnung.

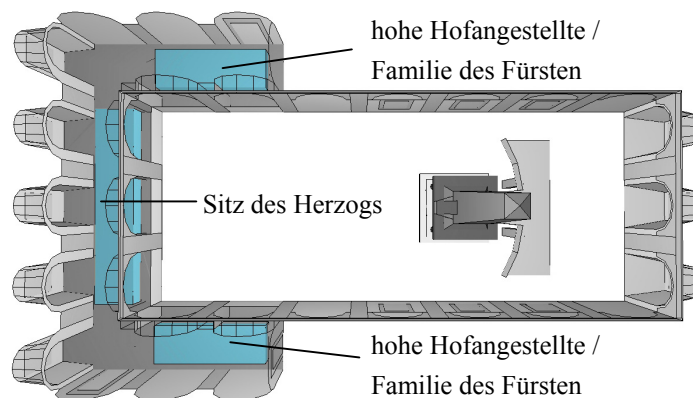


Abb. 5.4: Sitzplatzbereich im 2. Obergeschoss

Bei der Simulation im Zustand III wird eine voll besetzte Musikkapelle angenommen. An den Längsseiten sowie gegenüber der Orgel gruppieren sich um die Deckenöffnung ein Kammerchor sowie ein Kammerorchester. Auf der Seite der Orgel wird auf Grund des Platzmangels (ca. 60 cm] nur von dem Orgelspieler selbst oder einem Solisten ausgegangen (Abb. 5.5).

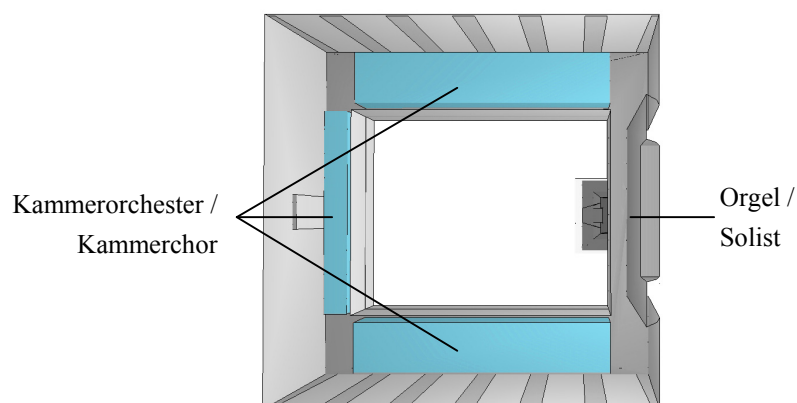


Abb. 5.5: Bereich der von Musikern besetzten Fläche in der “Capella“

5.1.2 Absorptionswerte

Nachdem die Geometrie der Schlosskapelle in das Simulationsprogramm übertragen wurde, konnten den einzelnen Flächen die akustischen Materialparameter zugewiesen werden. Die absorbierenden Eigenschaften für die verschiedenen Flächen wurden auf der Grundlage des Kapitels 3 “Architektonische Rekonstruktion der Schlosskapelle“ recherchiert und zugewiesen. Dabei kamen hauptsächlich die drei Literaturquellen zur Anwendung, die schon bei dem Referenzobjekt verwendet wurden (Kap. 4.3.5, S. 99, Abs. 3). Im Folgenden werden alle verwendeten Absorptionswerte vorgestellt und tabellarisch zusammengefasst.

Das Absorptionsvermögen der Steinfußböden im Erdgeschoss wurde vorrangig von der Oberflächenrauigkeit bestimmt, da das Ziegelpflaster sowie die Steinplatten auf einem festen Untergrund verlegt wurden. Die Steinplatten im Chorbereich entsprechen denen der heutigen Weißenfelder Schlosskapelle (Kap. 3.2.2, S.54, Abs. 2). Auf Grund der aufgerauten Oberfläche der Platten wurde der Absorptionswert eines rauen Steinbodens zugeordnet, der auch bei den aus Sandstein bestehenden Stufen des Kanzelaltars und des Altarblockes verwendet wurde.

Für das Ziegelpflaster im Langhaus konnte eine Verbindung zu dem Bodenbelag aus gebrannten Ziegeln in der Tiefurter Dorfkirche hergestellt werden (Kap. 3.2.2, S.54, Abs. 1). Dieser besitzt einen größeren Fugenanteil als die Platten der Weißenfelder Schlosskapelle und ist wesentlich poröser. Da kein Absorptionswert eines gleichwertigen Fußbodenaufbaus vorhanden war, ist eine Kombination aus einer rauen Betonoberfläche und eines unverputzten Ziegelmauerwerks erstellt worden (Tabelle 5.2).

Tabelle 5.2: Absorptionsgrade α der Fußböden im Erdgeschoss

Oktavmittenfrequenzen [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	Quelle
Steinplatten im Chorbereich, Altarblock	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	[Mey 04, S. 163]
Ziegelpflaster im Langhaus	0,02	0,03	0,05	0,06	0,07	0,07	[Bob 90, S.91], [ptb 04, Nr. 29]

Die raumumschließenden Wände stellen auf Grund der starken Mauern kein schwingungsfähiges System dar. Der Absorptionsgrad wird daher nur infolge auf der Oberflächenbeschaffenheit gewählt. Das Kalkbruchsteinmauerwerk wurde in allen Geschossen mit einem glatten Kalkputz versehen, der auch bei den Gewölbeflächen zur Anwendung kam. Die beiden Blindfenster im ersten Obergeschoss wurden durch Farbe vorgetäuscht, wodurch die Porosität des Putzes herabgesetzt wird. In dem Berechnungsmodell wird dieser Umstand durch eine geringere Absorption berücksichtigt. Die Strukturierung der Gesimsbänder und Rundbögen, der Pfeiler und Pilaster sowie des Maßwerks an den Brüstung der Emporen in beiden Obergeschossen wurde durch Gips herausgearbeitet. Diesen Flächen wurden die Eigenschaften einer flächig sowie einer stark gegliederten Stuckverzierung zugewiesen.

Tabelle 5.3: Absorptionsgrade α der Wandflächen

Beschreibung	Absorptionsgrad α						Quelle
Wandflächen mit glatten Kalkputz, Gewölbefläche	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	[Mey 04, S. 160]
Blindfenster im 1. Obergeschoss	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04	[Bob 90, S.91]
Gesimsbänder, strukturierte Wandflächen	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	[Bob 90, S.91]
Pilaster, Pfeiler, Brüstungen der Emporen	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07	0,08	[Bob 90, S.91]

Der Fußboden der Emporen bestand aus einer Holzbalkendecke mit einfacher Dielung, wobei der hohe Wert im tiefen Frequenzbereich aus dem Schwingungsverhalten der Decke über dem vorhandenen Hohlraum resultiert. Für die Decke im 2. Obergeschoss als oberer Raumabschluss war kein Absorptionswert bekannt, der die Konstruktion richtig beschreibt. Aus diesem Grund wurden die Eigenschaften einer abgehängten Decke mit Putzträger mit denen eines Gipsputzes sinnvoll kombiniert. Die Oberseite der Decke – der Fußboden des Kapellenraumes – bestand aus starken Brettern mit einem Farbanstrich, weshalb hier der Absorptionswert für eine Holzdielung vor einem Hohlraum angenommen wird.

Tabelle 5.4: Absorptionsgrade α der Wand- und Deckenflächen aus Holzkonstruktionen

Beschreibung	Absorptionsgrad α						Quelle
Boden der Emporen	0,28	0,14	0,07	0,06	0,06	0,06	[Mey 04, S. 161]
Decken über dem 2. Obergeschoss	0,20	0,14	0,10	0,05	0,03	0,04	[Mey 04, S. 160], [Bob 90, S.91]
Boden im Dachgeschoss	0,15	0,12	0,10	0,07	0,06	0,06	[Mey 04, S. 163]
Wand und Kuppel der “Capella“	0,15	0,12	0,09	0,04	0,03	0,04	[Mey 04, S. 163], [Bob 90, S.91]

Die Konstruktion der Wandflächen der Musikerempore sowie der Kuppel konnte durch keinen vorhandenen Absorptionswert richtig beschrieben werden. Auf Grund des Hohlraumes zwischen äußerer und innerer Verbretterung war im tiefen Frequenzbereich eine hohe Absorption wirksam gewesen, ähnlich wie bei einer Holzbalkendecke. Der aufgetragene Gipsputz wird aber für hohe Frequenzen stark reflektierend gewirkt haben, weshalb eine Kombination der Eigenschaften einer Holzbalkendecke und eines Gipsputzes in Frage kommt. Da nicht bekannt ist, ob die Kuppel mit einem Gemälde versehen war, ob dieses ganzflächig aufgetragen oder nur einen Teil der Kuppelfläche einnahm, wurde auf die Berücksichtigung eines Farbanstriches verzichtet.

Tabelle 5.4: Absorptionsgrade α der Massivholzkonstruktionen

Beschreibung	Absorptionsgrad α						Quelle
Geländer, Tür- und Fensterrahmen, Stirnseite der Deckenöffnung, Stützen der “Capella“, der Altarempore und des Kanzelaltars	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,06	[ptb 04, Nr.358]
Türblatt	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,15	[Bob 90, S.92]
Baldachin des Kanzelaltars	0,15	0,12	0,10	0,07	0,07	0,06	[Mey 04, S. 163]
Aufbau des Kanzelaltars	0,27	0,25	0,10	0,07	0,06	0,06	[Mey 04, S. 160]
Altarempore	0,15	0,12	0,10	0,09	0,08	0,08	[Bob 90, S.92]

Allen sichtbaren Bauteilen und Elementen aus Massivholz wurde der Absorptionswert eines Holzbodens auf festem Untergrund zugewiesen, da bei diesem Wert die Absorption infolge von Resonanzschwingungen ausgeschlossen ist. Im Modell der “Himmelsburg“ werden damit die Stützen des Kanzelaltars sowie der dahinter befindlichen Altarempore, die Stirnseitenverkleidung der Deckenöffnung, alle Tür- und Fensterrahmen sowie die pilasterartig hervortretenden Vollholzstützen des Kapellenraumes erfasst. Das geschlossene Geländer des Altares sowie die

Ballustergeländer auf der Altarempore, im Erdgeschoss zur Trennung zwischen Chor und Langhaus sowie die Brüstung in der “Capella“ wurden ebenfalls mit diesen Absorptionswerten belegt.

Den Türblättern wurde der Absorptionsgrad einer schweren Holztür zugewiesen und für die Konstruktion der Altarempore wurden die Eigenschaften eines frei schwingenden Holzbodens angenommen. Die Zuordnung der akustischen Eigenschaften des pyramidalen Aufsatzes der Kanzel gestaltete sich komplizierter, da es sich um einen schwingungsfähigen Hohlkörper mit unbekanntem Traggerüst handelt. Zudem verjüngt sich der Aufbau mit zunehmender Höhe, so dass sich Richtung Oberseite auch die Absorptionseigenschaften ändern. Aus diesem Grund wurde nach Konstruktionen recherchiert, bei denen sich ein Holzaufbau vor einem Hohlraum befindet. Aus den unterschiedlichsten Angaben wurde eine Wandverkleidung aus Holzpaneelen mit einem geringen Wandabstand gewählt. Allerdings muss dieser Wert als ein grober Mittelwert des gesamten Aufbaus betrachtet werden, da eine exakte Bestimmung der Absorptionseigenschaften nur an einem Nachbau möglich wäre. Dem Baldachin als Unterbau des Aufsatzes wurden die Eigenschaften eines Schwingbodens zugewiesen.

Tabelle 5.6: Absorptionsgrade α der Fenster

Beschreibung	Absorptionsgrad α							Quelle
Fenster des Kirchenraumes	0,25	0,15	0,10	0,05	0,03	0,03		[Mey 04, S. 163]
Fenster des Kapellenraumes	0,10	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02		[Bob 90, S.92]

Für Verglasungen sind eindeutige Werte in der Literatur vorhanden. Für den Kirchenraum wurde eine normale Einfachverglasung angenommen. Um den Unterschied der akustischen Eigenschaften der wesentlich kleineren Fenster im Dachgeschoss zu berücksichtigen, wurde hier ein niedrigerer Absorptionswert angesetzt.

Für hölzerne Kirchenbänke auf steinernen Boden konnten eindeutige Werte gefunden werden. Über die Ausstattung der Bestuhlung auf den Emporen und der Musikerkapelle sind keine genauen Angaben bekannt, weshalb auch keine Aussage über die Stärke einer möglichen Polsterung getroffen werden kann. Aus diesem Grund wird in dem Berechnungsmodell ein loses Holzgestühl angenommen, das eine deutlich geringe Schallabsorption wie die geschlossenen Kirchenbänke aufweist. Infolge der starken Gliederung der Orgeloberfläche durch die unterschiedlichen Pfeifen wirkt die Orgel als Breitbandabsorber, der die gemittelten Werte einer typischen Orgeloberfläche zugewiesen wurden.

Tabelle 5.7: Absorptionsgrade α der Einrichtungsgegenstände

Beschreibung	Absorptionsgrad α						Quelle
Prospektfläche der Orgel	0,53	0,50	0,57	0,62	0,60	0,60	[Mey 04, S. 164]
Kirchenbänke im Erdgeschoss	0,10	0,15	0,18	0,20	0,20	0,20	[Mey 04, S. 164]
Stühle in den Obergeschossen und im Dachgeschoss	0,05	0,08	0,10	0,12	0,12	0,12	[Mey 04, S. 164]

Üblicherweise beziehen sich die in der Literatur angegebenen Werte für ein Publikum auf Konzertsäle, dass heißt den Messwerten liegt eine gepolsterte Bestuhlung und eine entsprechende lockere Kleidung für angenehm temperierte Räume zugrunde. In Kirchen muss davon ausgegangen werden, dass die Besucher im Mantel erscheinen und diesen während des Gottesdienstes auch nicht ablegen, was zu einer höheren Absorption führt. In Anbetracht des untersuchten Zeitraumes sollte auch von einer pompöseren Kleidung im Gegensatz zu einer heute üblichen Bekleidung ausgegangen werden, zumal es sich um eine Schlosskapelle handelt. Des weiteren wirkt sich auch die Besetzungsdichte auf die Absorptionseigenschaften aus. Im Erdgeschoss wird von 2 Personen je m² ausgegangen, da die Kirchenbänke mit einem Abstand von 95 cm sehr dicht platziert sind, während auf den Emporen ein Wert von 1,5 Personen je m² angesetzt wird. Derselbe Wert wird vereinfacht auch für die Musiker mit Instrumentarium im Kapellenraum angenommen. Die Absorptionsgrade stellen dabei jeweils einen Mittelwert für Kirchenbesucher dar [Mey 03, S.28].

Tabelle 5.8: Absorptionsgrade α des Publikums

Beschreibung	Absorptionsgrad α						Quelle
Publikum im Erdgeschoss	0,22	0,40	0,80	0,90	0,90	0,90	[Mey 04, S. 28]
Publikum in den Obergeschossen und Musiker in der "Capella"	0,20	0,35	0,75	0,80	0,90	0,90	[Mey 04, S. 28]

5.1.3 Streugrade

Wie bei dem Referenzobjekt werden – aus Mangel an geeigneten Angaben zu Streueigenschaften der verwendeten Materialien – fast ausschließlich die Abschätzwerte des “CATT-Handbuches” verwendet. In diesem wird neben einer von Publikum besetzten Fläche lediglich zwischen sehr glatten großen Flächen, Flächen durchschnittlicher Größe und glatter Oberfläche sowie Flächen mit einer rauen Oberfläche unterschieden (Kap. 4.2.2, S. 82, Abs. 5). In Tabelle 5.9 sind alle Raumbegrenzungsflächen den verwendeten Streugraden s zugeordnet.

Tabelle 5.9: Verwendete Streugrade s , “Himmelsburg“

Beschreibung	Oktavmittenfrequenzen [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
Deckenfläche im 2. Obergeschoss und Dachgeschoss (Kuppel)	0,08	0,08	0,09	0,09	0,10	0,10
Fußbodenflächen, glatte Wandflächen, Türen, Fenster, Gewölbe, Altarempore, Rückseite des Altares	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20
Unterer Teil der Altarstützen, Pfeiler und Pilaster, mit Stuck verzierte Wandflächen (Gesimse), Tür- und Fensterrahmen, vordere und seitliche Flächen des Altares/Baldachins, Orgel, Stirnflächen der Deckenöffnung, Geländer	0,10	0,15	0,30	0,60	0,80	0,80
Palmenblätter der Altarstützen	0,10	0,25	0,45	0,70	0,90	0,90
Unbesetzte Kirchenbänke und Stühle	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80
Mit Publikum und Musikern besetzte Sitzflächen	0,35	0,50	0,55	0,70	0,85	0,80

Als sehr große Flächen mit glatter Oberflächenstruktur sind nur die Deckenfläche im zweiten Obergeschoss sowie die Kuppel der Empore anzusehen, da beide mit einem Gipsputz geglättet wurden. Die restlichen Raumbegrenzungsflächen sind den beiden übrigen Kategorien – Flächen einer durchschnittlichen Größe sowie klein strukturierte Flächen – zugeordnet worden. Besonders zu erwähnen wäre dabei der Kanzelaltar, dessen Vorder- und Seitenflächen als stark diffus streuend betrachtet werden, da hier Verzierungen in Form von Schnitzereien angebracht waren, während die Rückseite als eine glatte Fläche anzusehen ist (Kap. 3.2.7, S. 62, Abs. 1). Um der hohen Detailtreue der Palmenblätter-Nachbildung an den Altarstützen (Abb. 3.30) Rechnung zu tragen, wurde ein weiterer Streugrad s über die Strukturgröße der Einzelblätter abgeschätzt. Bei den als Block modellierten Besetzungsflächen ist für die Kirchenbänke im Erdgeschoss sowie für das lose Gestühl in den Obergeschossen der selbe Streugrad s verwendet worden, wie er auch in dem “CATT-Handbuch” Verwendung fand. Für ein anwesendes Publikum wurde dieser Streuwert erhöht, da der Schall besonders durch den Kopf- und Schulterbereich von Personen sehr stark gestreut wird [Mey 03, S.16].

Um die Zuordnung der verschiedenen Streugrade besser zu verdeutlichen, sind an dem visualisierten Berechnungsmodell (Abb. 5.6) alle stark diffus streuenden Flächen der Zeilen 3 bis 5 der Tabelle 5.9 farblich hervorgehoben. Es ist gut zu erkennen, dass ein hoher Anteil der Raumbegrenzungsflächen infolge dekorativer Verzierungen stark diffus streuend gewirkt hat. Dadurch wird bei Reflexionen besonders der Energieanteil hoher Frequenzen stark reduziert, wodurch diesen Reflexionen ihre Aufdringlichkeit und Schärfe genommen wird. Dieser Effekt ist typisch für die oftmals stark strukturierten barocken Kirchen [Mey 03, S.119].

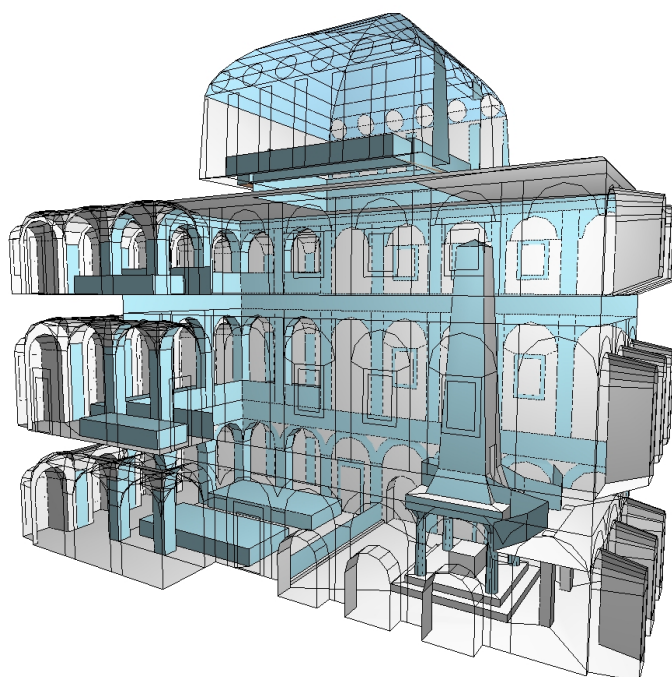


Abb. 5.6: Stark diffus streuenden Flächen des Berechnungsmodells der “Himmelsburg“

Neben dem Streugrad s wird bei glatten flachen Flächen, die in Bezug zur Wellenlänge geringe Abmessungen haben, ein Streugrad e angesetzt, durch den die Kantenbeugung an den Randbereichen simuliert wird (Kap. 4.2.3, S. 84, Abs. 3). Im Modell wurden die Effekte der Kantenbeugung bei allen Pfeilern und Stützen, dem Fußbodensprung im Erdgeschoss, den Sandsteinstufen des Altares, den schmalen Rundbögen der Fensternischen in den Querwänden sowie den Bögen zwischen den Pfeilern berücksichtigt. Des weiteren wurde die Kantenbeugung bei den aus Holz bestehenden Fenster- und Türflächen inklusive der Rahmen, den Stirnseiten des Baldachins sowie der Stirnseiten der Deckenöffnung und bei der Prospektfläche der Orgel angewendet.

5.1.4 Transmissionsgrad

Schalltransparente Eigenschaften sind in dem Modell ausschließlich den Geländern mit Ballustern zugewiesen worden (auf der Altarempore, im Erdgeschoss zur Trennung zwischen Chorbereich und Langhaus, im Kapellenraum). Die Höhe der Transmissionsverluste wurde, wie schon bei dem Referenzobjekt, über die Strukturgröße der Balluster und der Wellenlänge des untersuchten Schalls abgeschätzt. In Tabelle 5.10 sind die verwendeten Transmissionskoeffizienten dargestellt.

Tabelle 5.10: Verwendeter Transmissionskoeffizient t , “Himmelsburg“

Beschreibung	Oktavmittenfrequenzen [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
Alle verwendeten Ballustergeländer	0,90	0,85	0,80	0,75	0,65	0,50

5.1.5 Raumklima

Das Raumklima stellt für die raumakustische Simulation eine wesentliche Randbedingung dar, da es die Eigenschaften des Ausbreitungsmediums zum Teil maßgeblich beeinflusst (siehe E.2.2 “Dissipationsverluste an der Luftschicht“). Für die historische Schlosskapelle gibt es keine Anhaltswerte, so dass Temperatur und Feuchtigkeitsgehalt abgeschätzt werden mussten. Es wird angenommen, dass sich in der “Himmelsburg“ auf Grund der massiven Außenwände und des kleinen Fensterflächenanteils (Kap. 5.2.1, S. 127, Abs. 2) die Klimabedingungen im Jahresverlauf nicht maßgeblich geändert haben. In Tabelle 5.11 werden die in der Simulation verwendete Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Dichte der Luft angegeben.

Tabelle 5.11: Raumklima in der “Himmelsburg“

Eigenschaften der Umgebungsluft		
Temperatur T	18	[°C]
Luftfeuchtigkeit φ	40	[%]
Dichte ρ	1,20	[kg/m³]

5.1.6 Messpositionen

Für die Simulation der Schallfeldparameter wurden imaginäre omni-direktionale Schallfelderreger verwendet, mit denen die Bewertungskriterien nach den Anforderungen der DIN EN ISO 3382 ermittelt werden konnten. Untersucht wurde die Situation einer Predigt, in dem eine Erregerquelle in Sprecherhöhe auf der Kanzel positioniert wurde, sowie das Schallfeld bei einem musikalischen Vortrag (Orgelspiel), in dem eine zweite Erregerquelle vor der Orgel angeordnet wurde. Da sich Kanzel und Orgel zentral im Raum – und damit auf der Symmetrieachse – befinden, wurde ein dritter Schallerreger verwendet. Dieser wurde unsymmetrisch im Chorbereich aufgestellt und simuliert einen Sängerkhor. Bei der Simulation dient er zur Überprüfung der Simulationsergebnisse der beiden anderen Schallquellen. Weichen die Ergebnisse der ersten beiden Schallquellen von der dritten stark ab, könnte dies eine Folge des symmetrischen Aufstellungsortes sein. Um mögliche Ungenauigkeiten bei der Schallanregung von der Musikerkapelle auszuschließen, wird diese Schallquelle zusätzlich für die Ermittlung der Nachhallzeit benötigt, die nach DIN EN ISO 3382 über mindestens zwei Quellpositionen gemittelt werden. In Tabelle 5.12 sind alle bei der Simulation verwendeten Quellpositionen aufgelistet.

Tabelle 5.12: Verwendete Schallquellpositionen in der “Himmelsburg“

Schallquellposition	Aufstellungsort	Simulierter Zustand	Höhe [m]
A	auf der Kanzel	Predigt	1,50
B	im Chorbereich	Sängerkhor unsymmetrisch vor der Kanzel	1,50
C	vor der Orgel	Musikalischer Vortrag aus der “Capella“	1,50

Bei der Wahl der Messpositionen wurde auf die Mindestabstände zwischen den Messpunkten und den Raumbegrenzungsflächen geachtet (Kap. 4.3.2, S. 91, Abs. 2). Im Erdgeschoss und den Obergeschossen sind die Positionen gleichmäßig über die vom Publikum besetzte Fläche in einer Höhe von 1,20 m verteilt worden, im Erdgeschoss zusätzlich unter den Emporen und vor den Kirchenbänken in einer Höhe von 1,50 m, womit auf die Ohrhöhe eines stehenden Menschen eingegangen wird. In Tabelle 5.13 sind alle verwendeten Messpositionen nach ihrem Aufstellungsort und der Messhöhe zusammengefasst. Die exakte Lage der Schallquellen und Messpositionen im Grundriss kann den Plänen im Anhang E.6 “Himmelsburg“ entnommen werden.

Die Anforderungen an einen Mindestabstand zwischen Messposition und Schallerreger wurden mit der Größe des Hallradius überprüft (siehe E.3.2 “Nahfeld und Hallradius“), der im besetzten Zustand bei 4000 Hz seine maximale Größe von 3,15 m erreicht. Im Anhang E.6.1 “Grundriss Erdgeschoss“ ist der Hallradius mit gestrichelter Linie um die Schallquellpositionen A und B

ingezeichnet. Es ist zu erkennen, dass sich die Messpunkte 18, 21 und 22 innerhalb des Hallradius der Schallquelle B befinden. Aus diesem Grund werden diese Messpunkte für die Ermittlung der über den Raum gemittelten Nachhallzeit ausgeschlossen. Bei der Untersuchung der Energiekriterien, die sich ausschließlich auf die Schallerreger auf der Kanzel und vor der Orgel beziehen, können diese Messpunkte ohne Bedenken verwendet werden.

Tabelle 5.13: Verwendete Messpositionen in der “Himmelsburg“

Mikrofonposition	Aufstellungsort	Höhe [m]
01 – 10	Erdgeschoss – über den Kirchenbänken	1,20
11 – 17	Erdgeschoss – unter den Emporen	1,50
18 – 20	Erdgeschoss – vor den Kirchenbänken im Langhaus	1,50
21 – 23	Erdgeschoss – im Chorbereich	1,50
31 – 38	1. Obergeschoss – über den Sitzplätzen der Zuhörer	1,20
41 – 48	2. Obergeschoss – über den Sitzplätzen der Zuhörer	1,20
51 – 59	Dachgeschoss – über den Sitzplätzen der Musiker	1,20

Neben der numerischen Auswertung der einzelnen Messpunkte wird eine grafisch-visuelle Auswertung in Form von Schallkarten vorgenommen (Kap. 4.2.4, S. 86, Abs. 4). Alle auf eine definierte Fläche einfallenden Strahlen werden dabei registriert und so die Schallfeldparameter und Bewertungskriterien bestimmt. In der Simulation dienen die Abmessungen der Fußbodenflächen im Erdgeschoss sowie in den Obergeschossen als Schallkarten, wobei für die Strahlenregistrierung eine Höhe von 1,20 m über diesen Flächen definiert wurde. Als Auflösung der Schallkarten diente eine Rastergröße von 0,50 m.

5.2 Auswertung der Raumgestaltung

Vor der Auswertung der Simulationsergebnisse an den einzelnen Messpunkten wird der Raum grundsätzlich akustisch eingeschätzt. Dabei spielen beispielsweise die typischen geometrischen Gegebenheiten eine wesentliche Rolle, da schon mit einer Analyse der Raumgeometrie akustisch differenzierte Platzbereiche ausgemacht werden können, ohne genaue Zahlenwerte der Bewertungskriterien zu kennen. Für andere Voruntersuchungen werden Formeln verwendet, mit denen die Materialeigenschaften des Raumes statistisch behandelt werden, wodurch Rückschlüsse auf die prinzipiellen akustischen Eigenschaften gezogen werden können.

Eine Möglichkeit stellt die Untersuchung der verschiedenen Absorptionsflächen dar. Um den Einfluss der unterschiedlichen Materialien und Konstruktionen auf das Schallfeld abschätzen zu können, muss neben dem Absorptionsgrad α die vorhandene geometrische Fläche S berücksichtigt werden. Besonders die Größe der Fläche im Verhältnis zur Gesamtbegrenzungsfläche des Raumes ist dabei grundsätzlich Gegenstand der Betrachtung.

5.2.1 Absorptionsflächen

Werden die in der "Himmelsburg" verwendeten Absorptionsgrade näher untersucht, fällt auf, dass die Absorption im tiefen Frequenzbereich überwiegend durch Fenster und schwingungsfähige Holzkonstruktionen bestimmt wird, während sich auf hohe Frequenzen vorwiegend die Porosität und Rauigkeit der Oberflächen sowie die Anwesenheit von Publikum auswirkt. Für eine genauere Untersuchung der Absorptionswirkung bestimmter Flächenanteile werden in Tabelle 5.14 und Tabelle 5.15 die maßgeblichen Flächen – getrennt nach ihren Absorptionsvermögen – aufgelistet. Geometrisch kleine Flächenanteile wie Stufen oder Vorsprünge sind dabei vernachlässigt worden.

Tabelle 5.14: Maßgebliche Flächen für die Absorption hoher Frequenzen

Beschreibung	Fläche
Wand- und Gewölbeflächen mit Kalkputz	1172 m ²
Strukturierte Wandflächen mit Gipsputz	633 m ²
Steinfußböden	176 m ²
Summe:	1981 m²

Bei dem Vergleich der unterschiedlichen Flächenanteile aus Tabelle 5.14 und Tabelle 5.15 stellt man fest, dass die Wandflächen den überwiegenden Anteil der gesamten Raumbegrenzungsflächen einnehmen, während die in der Literatur oft als maßgeblich für die Absorption tiefer Frequenzen beschriebenen Fensterflächen [Mey 03, S.101] verschwindend gering sind (2,3 % der Gesamtbegrenzungsfläche). Auch die Emporen, die nach Meyer [Mey 03, S.112] die Ursache der typischen Absorption tiefer Frequenzen in Barockkirchen darstellen, nehmen nur eine relativ geringe Fläche ein. In der “Himmelsburg“ sind demnach für die Akustik hauptsächlich die Wandflächen verantwortlich. Für diese kann der angenommene Absorptionsgrad als relativ genau angesehen werden, da sich die Absorptionseigenschaften historischer Putzflächen auf Mauerwerk von heute gebräuchlichen Putzarten nicht großartig unterscheiden.

Tabelle 5.15: Maßgebliche Flächen für die Absorption tiefer Frequenzen

Beschreibung	Fläche
Fensterflächen	73 m ²
Wand- und Kuppelfläche der Musikerempore	213 m ²
Fußboden der Emporen	180 m ²
Deckenfläche über dem 2. Obergeschoss	132 m ²
Kanzel und Altarempore	154 m ²
Summe:	752 m²

Mit den gewählten Absorptionsgraden und den zugehörigen geometrischen Flächen kann auch ein Gesamtabsorptionsgrad des Raumes berechnet werden, der Rückschlüsse auf das Absorptionsverhalten zulässt und als statistischer Wert gut mit anderen Räumlichkeiten verglichen werden kann. In Tabelle 5.16 wird der Gesamtabsorptionsgrad der Weimarer Schlosskapelle, inklusive des Kapellenraumes, für den Zustand I und den Zustand III angegeben. Im Vergleich mit dem von Beranek [Ber 04] angegebenen Restabsorptionsgrad “für einen Zuschauerraum (Konzertsaal) mit einem hohen Anteil an leichten Gips- bzw. Holzverkleidungen und einigen zusätzlich absorbierenden Flächen“ [Wei 02, S.148], fällt der Wert der “Himmelsburg“ geringer aus, auch bei Berücksichtigung des Publikums.

Tabelle 5.16: Gesamtabsorptionsgrad der “Himmelsburg“

Oktavmittelfrequenzen [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
Gesamtabsorptionsgrad α_{ges} , Zustand I	0,08	0,06	0,05	0,05	0,06	0,06
Gesamtabsorptionsgrad α_{ges} , Zustand III	0,08	0,07	0,08	0,08	0,09	0,09
Restabsorptionsgrad α_{R} [Wei 02, S.149]	0,12	0,13	0,13	0,12	0,11	0,10

Dieser Vergleich verdeutlicht nochmals, dass der zur Gesamtoberfläche verhältnismäßig hohe Anteil an harten Putzoberflächen für das Gesamtabsorptionsverhalten – und damit für die Schallfeldparameter – maßgeblich verantwortlich ist. Zusätzlich kann mit diesem Wert eine grobe Abschätzung der zu erwartenden Nachhallzeit durchgeführt werden. Mit einer Gesamtfläche aller Raumbegrenzungsflächen des leeren Kirchenraumes von 3170 m², dem Gesamtabsorptionsgrad bei 1000 Hz und dem zugehörigen Schalldämpfungskoeffizienten für Dissipationsverluste an der Luftschicht von $m = 0,0011 \text{ 1/m}$, lässt sich die Nachhallzeit mit der Formel nach Sabine (Kap. 4.1.1, S. 66, Abs. 1) folgendermaßen abschätzen:

$$T_{\text{Sab}} = 0,163 \cdot \frac{V}{(\alpha_{\text{Ges}} \cdot A_{\text{Ges}}) + 4 \cdot m \cdot V} = 0,163 \cdot \frac{4729 \text{ m}^3}{(0,05 \cdot 3170) + 4 \cdot 0,0011 \cdot 4729} = 4,3 \text{ s}$$

Nach dieser Überschlagsrechnung ist demnach für den mittleren Frequenzbereich im leeren Raumzustand mit einer Nachhallzeit von über 4 s zu rechnen.

5.2.2 Volumenkennzahl

Die Nachhallzeit wird auf Grund des Absorptionsvermögens von den im Raum befindlichen Personen in entscheidendem Maße bestimmt. Die maximale Anzahl der anwesenden Personen richtet sich dabei nach der zur Verfügung stehenden Grundfläche, einschließlich der Emporen. Da die Nachhallzeit nach der Sabineschen Formel neben der Absorptionsfläche von dem vorhandenen Raumvolumen abhängig ist, kann für einen Raum ein funktionsbezogener Wert eines Mindestvolumens pro Person angegeben werden. Durch Berechnung dieses “spezifischen Volumens” – beziehungsweise der Volumenkennzahl VK – kann die Nachhallzeit der mittleren Frequenzen in Bezug zur optimalen Nachhallzeit (Kap. 4.1.2, S. 69, Abs. 1) abgeschätzt werden. Bei Konzertsälen für sinfonische Musik wird in der Regel von einem optimalen Wert zwischen 8 m³ / Person und 10 m³ / Person ausgegangen [Fas 98, S.142]. In Kirchen unterliegt dieser Wert allerdings starken Schwankungen, da einerseits die Besetzungszustände stark variieren und andererseits das Raumvolumen von Kirchen sehr unterschiedlich ausfallen kann. Für Orgelmusik wird ein optimaler Bereich des spezifischen Volumens von 10 m³ / Person bis 15 m³ / Person angegeben.

Da die Volumenkennzahl für eine prinzipielle Einordnung des Raumes sehr nützlich ist und diese einen Vergleich zwischen Räumlichkeiten ermöglicht, wird sie in Tabelle 5.17 für die “Himmelsburg” berechnet. Dabei wird davon ausgegangen, dass die angenommenen Sitzplätze mit der in Kap. 5.1.2, S. 120, Abs. 2 angenommenen Besetzungsdichte vollständig besetzt sind.

Die Berechnung ergibt eine Volumenkenzahl von ca. $22 \text{ m}^3 / \text{Person}$, welche relativ weit von dem optimalen Bereich entfernt ist. Eine nach dem Raumvolumen differenzierte Angabe gibt als optimalen Bereich für kleine Kirchen ($< 2.000 \text{ m}^3$) ca. $5 \text{ m}^3 / \text{Person}$ an und für große Kirchen ($> 5.000 \text{ m}^3$) in etwa $15 \text{ m}^3 / \text{Person}$ [Mey 03, S.148]. Diese Werte gelten für einen voll besetzten Zustand. Da bei der Simulation verschiedene Platzbereiche als unbesetzt behandelt wurden, es sich also um einen teilbesetzten Zustand handelt, wird eine weitere Berechnung der Volumenkenzahl durchgeführt. Dabei werden in der Berechnung die Platzbereiche im Erdgeschoss unterhalb der Emporen berücksichtigt, sowie ein Chor zwischen den Kirchenbänken und der Kanzel.

Tabelle 5.17: Volumenkenzahl der "Himmelsburg"

Ort	Besetzungsfläche	Besetzungsdichte	Personen
EG	41,70 m ²	2,0 [Pers. / m ²]	84
OG 1	31,67 m ²	1,5 [Pers. / m ²]	48
OG 2	31,67 m ²	1,5 [Pers. / m ²]	48
DG	26,82 m ²	1,5 [Pers. / m ²]	40
			220 Personen
Volumen des leeren Raumes			4729 m ³
Volumenkenzahl VK			21,5 m³/Person
Weitere Besetzungsflächen vollständig besetzt:			
- Stehplätze im Erdgeschoss unterhalb der Emporen			
- Chorsänger vor der Kanzel			
EG – Emporen	ca. 50 m ²	1,5 [Pers. / m ²]	75
EG – Chor	ca. 16 m ²	1,5 [Pers. / m ²]	24
			319 Personen
Volumenkenzahl VK			14,8 m³/Person

5.2.3 Direktschall und erste Reflexionen

Die verschiedenen Platzbereiche des Kirchenraumes können vor einer Simulation mit einfachen geometrischen Mitteln grob bewertet werden. Eine visuelle Möglichkeit bietet das verwendete Simulationsprogramm durch den “Open-GL-Viewer“, mit dem die Sichtbeziehung zur Schallquelle für jeden Empfängerpunkt sehr anschaulich überprüft werden kann. Dadurch sind Rückschlüsse auf den Direktschalleinfluss möglich sind. Das infolge der unterdrückten Sichtbeziehung zur Schallquelle hinter den Pfeilern ein Schallschatten für hohe Frequenzbereiche entsteht, wurde schon mehrfach erwähnt und wird an dieser Stelle nicht näher demonstriert.

Die protestantische Liturgie rückte die Predigt in den Mittelpunkt des Gottesdienstes und forderte demzufolge für alle Platzbereiche eine gute Sicht auf den Geistlichen (Kap. 2.4.2, S. 33 Abs. 3), womit in der Regel auch die Verständlichkeit gesprochener Worte gefördert wird. Begünstigt wurde die Sprachverständlichkeit auch durch die Emporen, die als das wesentlichste Element des protestantischen Kirchenbaus (Kap. 2.4.2, S. 34 Abs. 2) eine möglichst nah um den Geistlichen angeordnete Zuhörerschaft ermöglichte. Wie das Kirchenschiff und die Emporen in der “Himmelsburg“ mit Direktschall versorgt wurden – vordergründig bei einer Schallanregung von der Kanzel und dem Kapellenraum aus – wird mit folgenden Grafiken anschaulich demonstriert.

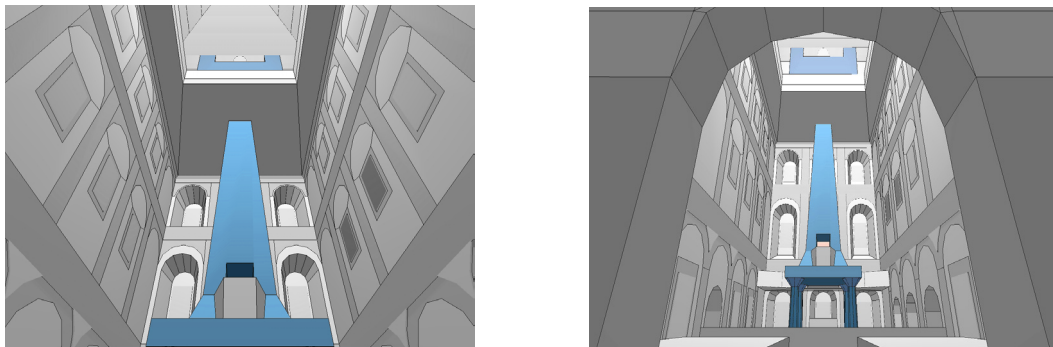


Abb. 5.7: Blick aus dem Erdgeschoss Richtung “Capella“, links: von der vordersten Kirchenbank, rechts: zentral unter den Emporen

In Abb. 5.7 ist gut zu erkennen, dass von allen Sitzplätzen im Erdgeschoss ein direkter Sichtkontakt zur Kanzel und der Orgel (farblich hervorgehoben) bestanden hat. Die vorderen Plätze in den Kirchenbänken hatten dabei “gerade noch“ eine Sicht auf die Orgel, an der Chorschranke konnte diese aber nicht mehr gesehen werden. Es wird demzufolge vermutet, dass der gesamte Bereich der Kirchenbänke infolge der Direktschallversorgung verhältnismäßig gute Bewertungskriterien aufweist.

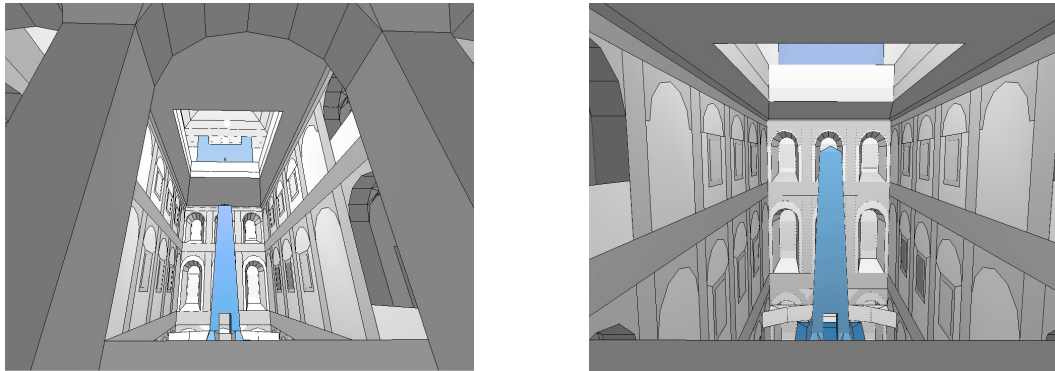


Abb. 5.8: Blick in Richtung “Capella“, links: aus dem 1. Obergeschoss, rechts: aus dem 2. Obergeschoss

Da die Emporen in der protestantischen Kirche auch zur Trennung der gesellschaftlichen Stände dienten (Kap. 2.4.2, S. 34, Abs. 3), gilt diesen Platzbereichen ein besonderes Interesse. In Abb. 5.8 ist die gute Sicht von der Empore im ersten Obergeschoss auf die Kanzel sowie auf die Orgel zu erkennen, die als Standorte der verwendeten Schallquellen farblich hervorgehoben sind. Damit ist eine gute Vorraussetzung für eine gute Sprachverständlichkeit sowie Durchsichtigkeit bei musikalischen Darbietungen aus der Musikerkapelle gegeben.

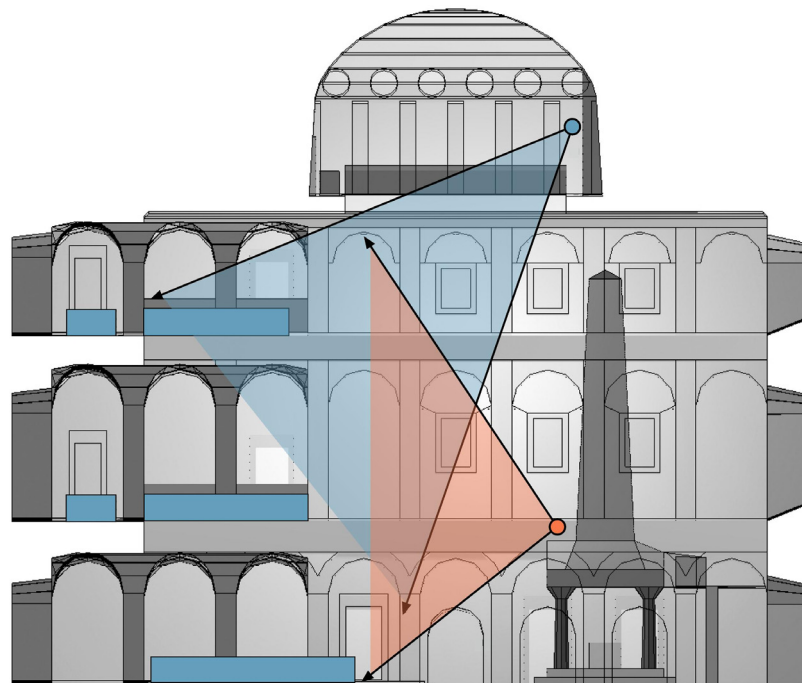


Abb. 5.9: Versorgung der Sitzplätze mit Direktschall

Bei dem Blick von der Empore im zweiten Obergeschoss (Abb. 5.8) in den Kirchenraum – von dem Fürstensitz aus – ist zwar ein direkter Sichtkontakt zur Kanzel vorhanden, die Orgel kann jedoch nur teilweise gesehen werden. Aus diesem Grund wird davon ausgegangen, dass die zweite Empore fast ausschließlich durch gebeugte Schallwellen von dem Kapellenraum aus versorgt wurde. Dadurch kam es zu einer Klangverschiebung (Kap. 4.2.3, S. 84, Abs. 1) und damit zu einer verminderten musikalischen Qualität auf diesen Platzbereichen.

Der gleiche Sachverhalt ergibt sich auch durch die Verfolgung des Schalls in Form von Strahlen. In Abb. 5.9 wird in dem Längsschnitt des Berechnungsmodells der Bereich farblich hervorgehoben, der durch Schallstrahlen direkt erreicht wird. Es ist ersichtlich, dass die vorderen Reihen der Kirchenbänke gerade noch mit Direktschall von der Orgel versorgt wurden, währenddessen die gesamte obere Empore auf Grund der Deckenöffnung und der Mauerbrüstung nicht direkt erreicht werden konnte. Des weiteren ist deutlich zu erkennen, dass von der Kanzel aus alle Sitzplätze gut mit Direktschall versorgt wurden. Die Emporen wurden zudem von zeitigen ersten Reflexionen an der Decke erreicht, das im Erdgeschoss auf Grund der Deckenöffnung nicht möglich war. Demnach waren die Forderungen der protestantischen Kirche in der “Himmelsburg” zumindest für die Predigt auf allen Platzbereichen erfüllt. Ob diese Feststellungen auch durch die Bewertungskriterien bestätigt werden, wird im Kapitel 5.3 “Auswertung” dargestellt.

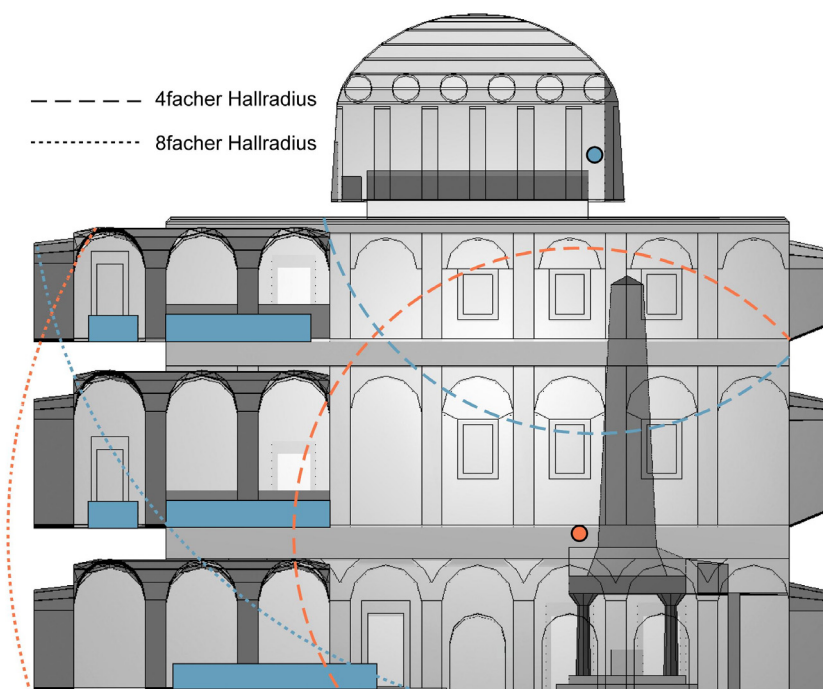


Abb. 5.10: Ortung der Schallquellenposition in Abhängigkeit des Hallradius

Durch die Abb. 5.10 kann ein weiteres akustisches Kriterium sehr anschaulich bewertet werden. Für die Verständlichkeit und Durchsichtigkeit sind der Direktschall und die ersten Reflexionen maßgeblich verantwortlich. Als ein Maß für die Bewertung kann dabei das Stärkeverhältnis zwischen Direktschall und dem statistischen Nachhallfeld verwendet werden, dass sich über den Hallradius ausdrücken lässt. Es wird davon ausgegangen, "dass bei mittleren Frequenzen eine Ortung der Schallquelle noch bis zu einer Distanz vom vierfachen Hallradius möglich ist." [Mey 03, S.103]. Besitzt der zu untersuchende Schall einen starken Anteil an hohen Frequenzen, kann die Schallquelle noch bis zu dem achtfachen Hallradius geortet werden. Alle Plätze in diesem Bereich werden demnach mit einer ausreichenden Stärke des Direktschalls versorgt, während bei Plätzen außerhalb des angegebenen Bereiches die Schallenergie des Direktschalls die Verständlichkeit und Durchsichtigkeit nicht mehr maßgeblich charakterisiert.

Für die "Himmelsburg" ergibt sich für den besetzten Zustand ein Hallradius im mittleren Frequenzbereich von $r_H = 2,54$ m. Der vierfache sowie der achtfache Hallradius ist in Abb. 5.10 um die Schallquelle vor der Orgel sowie auf der Kanzel eingezeichnet. Für die Orgel befanden sich alle Platzbereiche außerhalb des vierfachen Hallradius. Im Erdgeschoss waren sogar alle Sitzplätze außerhalb des achtfachen Hallradius. Das bedeutet, dass der Schall im Erdgeschoss noch von "oben kommend" wahrgenommen werden konnte, eine genaue Ortung der Schallquelle aber nicht mehr möglich war, da der Schall die Zuhörer stark durchmischt und diffus erreicht hat. Damit fehlten die energetisch herausragenden Komponenten, welche die Einfallsrichtung charakterisierten. Für den Geistlichen auf der Kanzel lagen dagegen alle Plätze innerhalb des achtfachen Hallradius, das die Sprachverständlichkeit förderte.

Neben der starken Absorptionswirkung des Publikums tritt in Räumen mit hohem Besetzungsgrad ein weiterer, durch das Publikum bedingter Effekt auf. Wenn Schallwellen über eine stark absorbierende Fläche, wie sie das Publikum darstellt, in einem flachen Winkel hinweg laufen, nimmt die Schallenergie schneller ab als es auf Grund der geometrischen Ausbreitung (siehe E.2.1 "Geometrische Ausbreitung") geschehen würde. Die Schallwellen werden dann "praktisch in den Absorber hineingebeugt" [Mey 03, S.16]. Da es sich demnach um ein wellencharakteristisches Problem handelt, wird es von dem Simulationsprogramm nicht berücksichtigt und es kann zu einer Fehleinschätzung der Simulationsergebnisse kommen. Durch die Darstellung in Abb. 5.10 wird verdeutlicht, dass dieser Effekt in der "Himmelsburg" nicht maßgeblich ist, da besonders bei musikalischen Vorträgen aus der "Capella" die Schallwellen fast senkrecht auf die Publikumsfläche treffen. Durch die typisch protestantische Erhöhung der Kanzel, die sich durch den Einbau von Emporen ergeben hat, um die Zuhörer in den oberen Geschossen besser zu erreichen (Kap. 2.4.2, S. 35, Abs. 2), tritt dieser Effekt auch nicht bei einem Sprecher von der Kanzel auf.

5.3 Auswertung der akustischen Simulation

Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse der Schlosskapelle numerisch und grafisch vorgestellt und bezüglich ihrer Lage zu Optimalwerten untersucht. Mit Hilfe der Energiekriterien wird die akustische Qualität der “Himmelsburg” zwischen einer Nutzung für Sprachdarbietungen sowie für musikalische Aufführungen differenziert betrachtet und hinsichtlich ihrer Eignung bewertet. Als das wesentlichste Charakteristikum zur Beschreibung der akustischen Verhältnisse von Kirchen wird die Nachhallzeit als erstes näher untersucht. Anhand der simulierten Werte wird die subjektiv empfundene Halligkeit und damit das raumakustische Klangbild beschrieben. Mit der mittleren Nachhallzeit sowie dem spektralen Verlauf wird überprüft, wie sich die “Himmelsburg” in den baustiltypischen Bereich barocker Kirchenräume einordnet.

Der Einfluss von Störgeräuschen, die besonders die Wirkung musikalischer Vorträge beeinträchtigen können, wurde nicht untersucht. Einerseits resultieren derartige Störeinflüsse in der heutigen Zeit überwiegend aus technischen Hausanlagen und Verkehrslärm, die zu Bachs Zeiten in dieser Form nicht auftraten, andererseits boten die massiven Außenwände der Schlosskapelle einen guten Schallschutz zu den benachbarten Gemächern und dem Außenraum.

5.3.1 Nachhallzeit

Da die Nachhallzeit einen Raum statistisch beschreibt, soll vorerst untersucht werden, ob durch die Wahl der Rechenparameter (Teilchenanzahl, Strahlenverfolgungszeit) bei der Simulation ein ausreichend diffuses Schallfeld simuliert wurde und sich demzufolge eine statistische Nachhallzeit einstellt. Dafür sind in Tabelle 5.18 die Nachhallzeiten für alle 3 Schallquellpositionen und die drei Besetzungszustände für die untersuchten Oktavbandmittenfrequenzen zusammengetragen. Für die Schallposition auf der Kanzel wird für den leeren Raumzustand die Nachhallzeit für die verschiedenen Platzbereiche getrennt dargestellt. Anhand der Zahlenwerte ist zu erkennen, dass sich die einzelnen Geschosse hinsichtlich der Nachhallzeit nicht unterscheiden. Aus diesem Grund wird bei den weiteren Besetzungszuständen und Schallquellpositionen die Nachhallzeit zugunsten einer besseren Übersichtlichkeit über alle Messpositionen gemittelt angegeben.

Tabelle 5.18: “Himmelsburg“, räumlich gemittelte Nachhallzeit T_{30}

Oktavmittelfrequenzen [Hz]			125	250	500	1000	2000	4000
Zustand I	Schallquellposition	EG – Sitzplätze	3,55	4,15	4,27	4,12	3,31	2,10
		A (Kanzel)	3,55	4,19	4,30	4,13	3,31	2,07
		EG – Chor	3,49	4,19	4,29	4,13	3,29	2,10
		Emporen – OG 1	3,49	4,17	4,27	4,15	3,28	2,11
		Emporen – OG 2	3,51	4,17	4,31	4,12	3,32	2,10
		Summe Σ	3,5	4,2	4,3	4,1	3,3	2,1
		B (Chor)	3,5	4,2	4,3	4,1	3,3	2,1
		C (Orgel)	3,5	4,2	4,3	4,1	3,3	2,1
Zustand II	A (Kanzel)		3,5	3,8	3,8	3,6	3,0	2,0
	B (Chor)		3,5	3,8	3,8	3,6	3,0	2,0
	C (Orgel)		3,5	3,8	3,8	3,6	3,0	2,0
Zustand III	A (Kanzel)		3,1	3,1	2,5	2,3	2,1	1,5
	B (Chor)		3,1	3,1	2,5	2,4	2,1	1,5
	C (Orgel)		3,1	3,1	2,4	2,4	2,1	1,5

Durch die aufgeschlüsselten Werte aus Tabelle 5.18 wird das Vorhandensein eines ausreichend diffusen Schallfeldes bestätigt. Die Abweichungen zwischen einzelnen Messpunkten und unterschiedlichen Quellpositionen bewegen sich in allen Raumzuständen in der Größenordnung von weniger als einer Zehntel-Sekunde. Auch bei Schallanregung von der Musikerempore ist keine Veränderung der Nachhallzeit festzustellen. Diese Situation kann als glaubhaft betrachtet werden, da bei dem Vergleich der Mess- und Simulationswerte an dem Referenzobjekt die selben Verhältnisse festgestellt wurden (Kap. 4.3.7, S. 106, Abs. 2).

Tabelle 5.19: “Himmelsburg“, räumlich und spektral gemittelte Nachhallzeiten T_{low} , T_{mid} , T_{high}

Über A,B,C gemittelte Nachhallzeiten	T_{low} [s]	T_{mid} [s]	T_{high} [s]
Zustand I	3,8	4,2	2,7
Zustand II	3,6	3,7	2,5
Zustand III	3,1	2,4	1,8

Auf Grund der Tatsache, dass die Nachhallzeit in allen Raumbereichen die gleiche Größe annimmt, kann ein einzelner, raumcharakteristischer Nachhallzeitverlauf angegeben werden. Da für die Beurteilung eines Raumes die mittleren Frequenzen von wesentlicher Bedeutung sind (Kap. 4.1.2, S. 69, Abs. 4) und um eine grundsätzliche Einordnung der raumakustischen Eigenschaften vornehmen zu können, wird die Nachhallzeit in Tabelle 5.19 als Einzahlkriterium T_{mid} angegeben. Für die Einschätzung der Klangfarbe werden zur Ermittlung des Bassverhältnis BR zusätzlich die Einzahlkriterien T_{high} für hohe und T_{low} für tiefe Frequenzen berechnet.

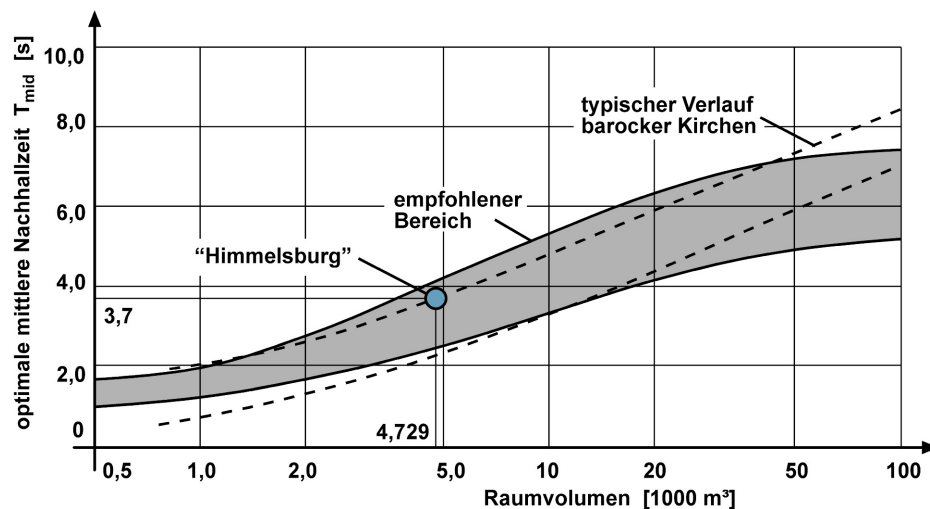


Abb. 5.11: Einordnung der Nachhallzeit T_{mid} der Himmelsburg in den Bereich optimaler Nachhallzeiten barocker Kirchen für den unbesetzten Zustand II

Die optimalen Nachhallzeiten beruhen ausschließlich auf Messungen in Kirchen mit vorhandener Bestuhlung. Aus diesem Grund wird für die Einordnung der Schlosskapelle hinsichtlich der Nachhallzeit die mittlere Nachhallzeit des unbesetzten Zustandes II verwendet. Die Ermittlung der Bewertungskriterien für den leeren Raumzustand wurde nur vorgenommen, da nicht eindeutig bewiesen werden konnte, ob eine ständige Bestuhlung in der Schlosskapelle vorhanden war. In Abb. 5.11 ist die Lage der mittleren Nachhallzeit der "Himmelsburg" in das Diagramm eingetragen, das nach Meyer den optimalen Bereich für Kirchen darstellt (Kap. 4.1.2, S. 71, Abs. 1). Dieser Bereich wurde bei der Untersuchung und Bewertung unterschiedlichster Kirchen ermittelt, wobei zusätzlich eine Trennung nach Baustilepochen stattfand. Die gestrichelte Linie kennzeichnet dabei den schmalen Bereich von typischen Barockkirchen, bei denen der Nachhall als raumtypisch empfunden wurde [Mey 03, S.114].

Nach Abb. 5.11 ordnet sich die mittlere Nachhallzeit der "Himmelsburg" in den für gut bzw. als typisch für Kirchen empfundenen Bereich ein. Hinsichtlich der charakteristischen Lage von

Barockkirchen befindet sich die mittlere Nachhallzeit in Bezug zu dem Raumvolumen an der oberen Grenze, aber immer noch innerhalb des repräsentativen Bereiches.

Für die Abschätzung der mittleren Nachhallzeit im besetzten Zustand wurde, den auf Messungen basierenden Nachhallzeiten im unbesetzten Zustand, eine Publikumsabsorption auf Grundlage der Volumenkenzahl hinzugefügt [Mey 03, S.148]. Auf diese Weise wurden nahezu lineare Kurven für den besetzten Zustand in Abhängigkeit des Volumens und des “spezifischen Volumens” ermittelt, die den optimalen Nachhallzeiten-Bereich eingrenzen. Mit der Volumenkenzahl für den vollbesetzten Zustand von $15 \text{ m}^3 / \text{Person}$ und dem Raumvolumen von 4729 m^3 (Kap. 5.2.2, S. 129, Abs. 1) ergibt sich nach [Mey 03, S.148] ein optimaler Bereich der Nachhallzeit für Barockkirchen von 2,3 s bis 2,7 s. Obwohl die Nachhallzeit $T_{\text{mid}} = 2,4 \text{ s}$ nach Tabelle 5.19 für einen teilbesetzten Zustand mit einer Volumenkenzahl von ca. $21 \text{ m}^3 / \text{Person}$ gilt, kann trotzdem festgestellt werden, dass sich die Schlosskapelle auch in diesen stiltypischen Bereich barocker Kirchen annähernd einordnet.

Anhand des spektralen Verlaufs der Nachhallzeit kann ebenfalls eine Einordnung bezüglich der Baustilepochen vorgenommen werden. Gotische Kirchen weisen grundsätzlich einen relativ starken Anstieg der Nachhallzeit zu tiefen Frequenzen hin auf [Mey 03, S.116], während bei Barockkirchen eine deutlich größere Variationsbreite vorhanden ist. Tendenziell wird eine Abnahme der Nachhallzeit bei tiefen Frequenzen bemerkt, aber auch ein schwacher Anstieg wurde verzeichnet. Die abfallende Nachhallkurve bei barocken Kirchen ist zum Teil ein Resultat der Architektur, bei der im Vergleich zu den älteren gotischen Kirchen ein größerer Fensterflächenanteil bevorzugt wurde. Vorwiegend sind aber die baulichen Veränderungen infolge der aufkommenden Reformation für den Abfall der Nachhallkurve verantwortlich, bei deren Ausbreitung große Holzeinbauten, besonders in Form von Emporen, in den Kirchenraum gelangten und als Tiefenabsorber wirkten.

Für die “Himmelsburg“ sind die Nachhallzeiten aller drei Zustände in Abb. 5.12 über die Frequenz aufgetragen. Zu erkennen ist im Zustand I und Zustand II der für barocke Kirchen typische Verlauf mit einer abnehmenden Nachhallzeit im tiefen Frequenzbereich. Der Fensterflächenanteil kann dafür nicht verantwortlich gewesen sein, da dessen Fläche nur einen geringen Teil der Gesamtbegrenzungsfläche einnahm (Kap. 5.2.1, S. 127, Abs. 1). Maßgeblich für Tiefenabsorption waren somit die schwingungsfähigen Holzeinbauten in Form der Altarempore, des Kanzelaltars und von Holzbalkendecken, besonders der im zweiten Obergeschoss. Der Einfluss der Bestuhlung und des Publikums ist ebenfalls an dem Verlauf der Nachhallzeit in Abb. 5.12 zu erkennen. Beide wirken als Breitbandabsorber, aber überwiegend im mittleren und hohen Frequenzbereich. Dadurch bewirkte das Publikum im vollbesetzten Zustand eine Verschiebung der Klangfarbe, da infolge der Höhen- und Mittenabsorption die Nachhallzeit zu tiefen Frequenzen hin anstieg.

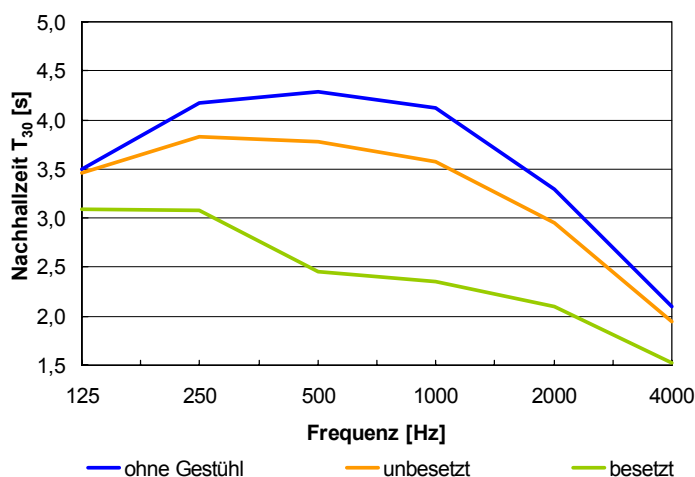


Abb. 5.12: “Himmelsburg“, 3 Raumzustände, Nachhallzeit T_{30}

Die Wirkung des Frequenzverlaufs der Nachhallzeit kann mit dem Bassverhältnis BR bewertet werden (Kap. 4.1.1, S. 68, Abs. 2), das in Tabelle 5.20 für die drei Zustände angegeben ist. Für den Zustand I ist es kleiner als eins, da die Nachhallzeit zu tiefen Frequenzen abnimmt, während im Zustand III ein Wert von 1,3 erreicht wird, der für musikalische Vorträge in Konzertsäle für sehr gut befunden wird, da durch den leichten Anstieg zu tiefen Frequenzen dem Klang mehr Wärme verliehen wird.

Tabelle 5.20: “Himmelsburg“, Bassverhältnis BR

	Zustand I	Zustand II	Zustand III
Bassverhältnis	0,9	1,0	1,3

Mit der Anfangsnachhallzeit EDT wird der subjektive Eindruck der Halligkeit besser beschrieben wird als mit der Nachhallzeit bezogen auf einen Pegelabfall von 60 dB. Aus diesem Grund wird zusätzliche der Frequenzverlauf des anfänglichen Pegelabfalls für die 3 Raumzustände in Abb. 5.13 dargestellt. Die Mittelung über alle Messpunkte und Schallquellpositionen ist in diesem Fall möglich, da sich die Werte der einzelnen Messpositionen nur sehr geringfügig unterscheiden (siehe Anhang E.7 “Daten-CD“). Dies wird dadurch deutlich, dass bei einem Vergleich zwischen Abb. 5.12 und Abb. 5.13 fast kein Unterschied festgestellt wird. Demnach entspricht die Steilheit des anfänglichen Pegelabfalls dem Gesamtpegelabfall, so dass der Nachhall als solcher empfunden wird, wie er durch die Nachhallzeit T_{30} beschrieben wird.

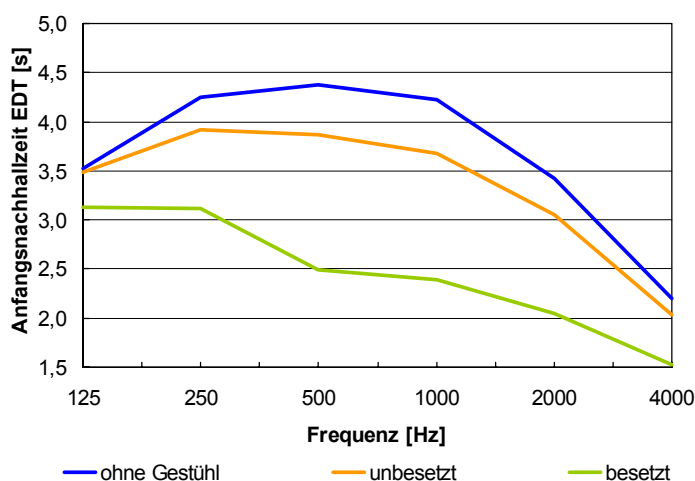


Abb. 5.13: “Himmelsburg“, 3 Raumzustände, Anfangsnachhallzeit EDT

Die raumakustische Untersuchung der Himmelsburg ist nicht nur wegen der architektonischen Besonderheit einer Musikerskapelle über dem Kirchenraum von besonderem Interesse, sondern auch ihre Bedeutung auf die musikgeschichtliche Entwicklung. Das Wirken Johann Sebastian Bachs in dieser Schlosskapelle geben einen großen Anreiz das raumakustische Klangbild näher zu analysieren. Vor allem wenn davon ausgegangen wird, dass die klangästhetischen Vorstellungen Bachs sowie seine in dieser Zeit entstandenen Kompositionen durch die akustische Atmosphäre und die klangliche Wirkung der “Himmelsburg“ beeinflusst wurden. Aus diesem Anlass soll der spektrale Verlauf der Nachhallzeit mit Kirchen verglichen werden, die im musikalischen Leben Bachs eine besondere Rolle gespielt haben.

In der St. Michaelis-Kirche in Ohrdruf erlernte Bach in jungen Jahren das Orgelspiel (Kap. 2.2.2, S. 19, Abs. 3). Die damalige Kirche war ein typisch gotischer Bau mit Langhaus und nördlichem Seitenschiff, das mit zwei übereinanderliegenden Emporen ausgestattet war [Mey 03, S.128]. Mit einem Volumen von ca. 3500 m³ war sie etwas kleiner als die “Himmelsburg“. In der heutigen “Bachkirche“ in Arnstadt war Johann Sebastian Bach erstmals als Organist angestellt. Zu seinem Amtsantritt war die Kirche gerade in barocker Manier umgebaut worden. Ein Tonnengewölbe aus Holz und auf drei Seiten umlaufende zweigeschossige Emporen schlossen ein Volumen von 6900 m³ ein. Sein zweites Organistenamt führte Bach in die Divi Blasii-Kirche in Mühlhausen, einer gotischen Hallenkirche mittlerer Größe ($V = 13.900 \text{ m}^3$). Maßgeblich beeinflusst wurde die Akustik dieser Kirche durch den porösen Tuffstein von Wänden und Gewölbe sowie den zweigeschossigen Emporen an drei Seiten. Seine bedeutendsten kirchenmusikalischen Werke komponierte Bach als Thomaskantor in Leipzig. Die Thomaskirche als gotische Hallenkirche mit Renaissance-Emporen besitzt im Verhältnis zu ihrem Volumen von 18.000 m³ eine sehr kurze Nachhallzeit, die sich auf die große Anzahl an hölzernen Einbauten und die starke Gliederung durch Säulen und Emporen zurückführen lässt. Im vollbesetzten Zustand weist der Verlauf der

Nachhallzeit eine typische Konzertsaalcharakteristik auf [Mey 03, S.134]. Infolge der reicheren Ausstattung zu Bachs Zeiten kam sie “nach heutigen Maßstäben fast einem Kammermusiksaal nahe“, wodurch “ein sehr hohes Maß an Deutlichkeit bei schnellen Figurationen und an Durchsichtigkeit bei polyphonen Stimmgewebe vorhanden war.“ [Mey 03, S.135].

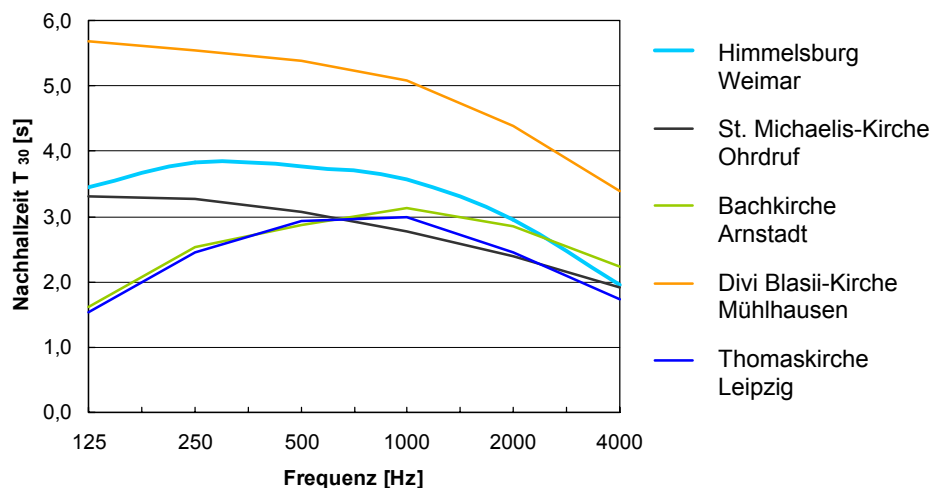


Abb. 5.14: Vergleich der Nachhallzeiten historischer Kirchenbauten, unbesetzter Zustand

Der Verlauf der Nachhallzeiten der vorgestellten Kirchen wurde von Messungen in den heutigen Kirchenräumen durch Veränderung der akustischen Raumeigenschaften in den Zustand von Bachs Schaffenszeit zurückgerechnet [Mey 03, S.127ff]. Die Frequenzverläufe entsprechen damit dem historischen Stand und sind demzufolge für einen Vergleich mit der Weimarer Schlosskapelle geeignet. In Abb. 5.14 sind die Nachhallzeiten für den unbesetzten Zustand dargestellt.

Die gotische Hallenkirche in Mühlhausen zeigt einen stiltypischen Verlauf und hebt sich von den anderen Kirchenräumen deutlich ab. Auch bei der Ohrdruffer St. Michaelis Kirche ist der für gotische Kirchen typische Anstieg zu tiefen Frequenzen zu erkennen, wobei auf Grund des geringeren Volumens die Kurve etwas flacher verläuft. Bei der Kirche in Arnstadt und der Leipziger Thomaskirche – als Vertreter der Barockkirchen – ist die charakteristische Erhöhung der mittleren Frequenzlagen deutlich zu erkennen. Trotz des größeren Volumens beider Kirchen ist die Nachhallzeit geringer als in der “Himmelsburg“, das durch mit stärker absorbierenden Baumaterialien zu erklären ist. Für hohe Frequenzen ist der Verlauf der Nachhallzeit in der Weimarer Schlosskapelle ab 1000 Hz in etwa mit der Arnstadter und Leipziger vergleichbar, der Abfall zu tiefen Frequenzen ist allerdings in der “Himmelsburg“ nicht so stark ausgeprägt. Dies kann auf die größere Anzahl an Einrichtungsgegenständen zurückgeführt werden und auf den flächenmäßig viel höheren Anteil der schwingungsfähigen Holzporenen an der Gesamtbegrenzungsfläche.

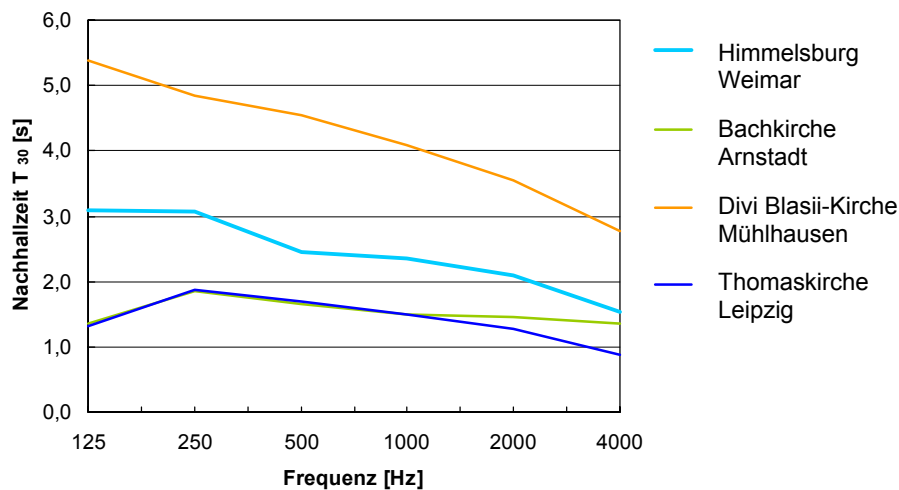


Abb. 5.15: Vergleich der Nachhallzeiten historischer Kirchenbauten, besetzter Zustand

In Abb. 5.15 wird der Frequenzverlauf für den besetzten Zustand dargestellt. Infolge der unterschiedlichen Größe der Kirchen wirkt sich der Einfluss des Publikums unterschiedlich stark auf die Veränderung des spektralen Verlaufs der Nachhallzeit aus. Deutlich erkennbar ist wieder der stärkere Anstieg zu tiefen Frequenzen im Gegensatz zu der Arnstädter und der Leipziger Kirche, die sich beide im besetzten Zustand fast frequenzneutral verhalten. Damit war auch im besetzten Zustand in der Weimarer Schlosskapelle ein “wärmerer” Klangeindruck vorhanden. Insgesamt kann aus dem Verlauf der Nachhallzeit festgestellt werden, dass sich die “Himmelsburg” nach akustischen Gesichtspunkten gut in den typischen Akustikbereich barocker Kirchen einordnen lässt, obwohl sie für eine barocke Schlosskapelle einen relativ langen Nachhall aufweist (Abb. 5.11). Im mittleren und hohen Frequenzbereich entspricht dabei der Frequenzverlauf in etwa dem der Thomaskirche in Leipzig, jedoch um ca. 0,8 s in Richtung eines längeren Nachhalls verschoben. Im tiefen Frequenzbereich nimmt die Nachhallzeit, im Gegensatz zur Thomaskirche, stärker zu. Demnach waren besonders in der tiefen Tonlage keine schnellen Figurationen möglich, wie beispielsweise in der Arnstädter Kirche [Mey 03, S.132], und auch mit der Akustik der Leipziger Thomaskirche kann sie nicht verglichen werden. Dafür wurde bedingt durch den etwas längeren Nachhall die akustische Atmosphäre eines Kirchenraumes bewahrt und der Anstieg zu tiefen Frequenzen förderte ein warmes und volles Klangbild. Die Ergebnisse in diesem Frequenzbereich sollten immer unter dem zusätzlichen Aspekt betrachtet werden, dass Abweichungen bei Simulationen auf Basis der geometrischen Akustik zu tiefen Frequenzen wahrscheinlicher werden.

5.3.2 Energiekriterien

Für eine allgemeine Beurteilung der Energiekriterien werden zuerst die über alle Messpunkte und die Oktavbänder bei 500 Hz, 1000 Hz und 2000 Hz gemittelten Werte angegeben. Mit diesen Größen können die akustischen Eigenschaften abgeschätzt werden und der Kirchenraum ist mit anderen Räumlichkeiten vergleichbar (Kap. 4.3.7, S. 105, Abs. 1).

Tabelle 5.21: “Himmelsburg“, räumlich und spektral gemittelte Energiekriterien, Schallquellposition A

	Zustand I		Zustand II		Zustand III	
	Simulation	Standartabw.	Messung	Standartabw.	Simulation	Standartabw.
D_{50} (3) [%]	15,7	7,8	17,2	8,1	26,0	8,2
C_{80} (3) [dB]	-5,4	1,8	-4,8	1,7	-2,2	1,2
G (3) [dB]	13,3	1,1	12,6	1,2	9,5	2,2
T_S (3) [ms]	290	31	257	26	167	18

In Tabelle 5.21 und Tabelle 5.22 sind alle gemittelten Energiekriterien für die drei Raumzustände und die relevanten Schallquellpositionen A und C zusammengefasst. Die Messpositionen 51 bis 59 des Kapellenraumes wurden dabei nicht mit einbezogen, da sie sich auf Grund der differenzierten Raumausstattung teilweise erheblich von den Kriterien der Zuhörerplätze unterscheiden und die Untersuchung der Zuhörerplätze im Vordergrund stand. Für die Berechnung der hier dargestellten Werte wurden zuerst für die verschiedenen Platzbereiche (Kirchenbänke, Erdgeschoss unter den Emporen, 1. Obergeschoss, 2. Obergeschoss) die Einzalkriterien erstellt und aus diesen arithmetisch nochmals ein Mittelwert für den gesamten Raum gebildet. Die vollständige Angabe der gemittelten Kriterien für die einzelnen Platzbereiche sowie die gesamten Simulationsergebnisse für alle Messpositionen sind im Anhang E.7 “Daten-CD“ zusammengefasst. Um die Einzalkriterien hinsichtlich ihres repräsentativen Charakters einschätzen zu können, wird zu jedem Energiekriterium die zugehörige Standartabweichung angegeben. Diese bezieht sich nur auf die Mittelung der Einzelwerte der verschiedenen Plätze – sie ist damit nicht als Standartabweichung für alle einzelnen Messpunkte aufzufassen.

Wird speziell der Zustand III untersucht, der die Werte bei einem anwesenden Publikum wiedergibt und damit repräsentativ für sprachliche oder musikalische Veranstaltungen ist, ergibt sich für den Deutlichkeitsgrad $D_{50}(3)$ eine noch gute Satzverständlichkeit bei ausreichender Lautstärke, die bei einer Schallanregung von der Musikerempore sogar etwas besser ist. Allerdings überschreitet bereits die Standartabweichung (nicht die maximale Abweichung) eine gerade wahrnehmbare Veränderung des Deutlichkeitsgrades (Kap. 4.1.4, S. 75, Abs. 1). Es sind demnach

“viel besser“ sowie “viel schlechter“ bewertete Platzbereiche vorhanden. Für das gemittelte Klarheitsmaß $C_{80}(3)$ werden Werte erreicht, die sogar in Konzertsälen für sinfonische Musik für gut empfunden werden. Aber auch hier liegt die Standardabweichung oberhalb der wahrnehmbaren Veränderungsschwelle (Kap. 4.1.4, S. 76, Abs. 1). Die Lautstärke, repräsentiert durch das Stärkemaß, ist ausreichend groß, aber ebenfalls sehr unterschiedlich auf die Platzbereiche verteilt. Bei einer Schallanregung von der Musikerkapelle liegt auch die Schwerpunktzeit noch innerhalb der Forderung für eine gute Durchsichtigkeit von Orchestermusik, für eine gute Verständlichkeit gesprochener Worte ist sie allerdings zu groß (Kap. 4.1.4, S. 76, Abs. 2).

Tabelle 5.22: “Himmelsburg“, räumlich und spektral gemittelte Energiekriterien, Schallquellposition C

	Zustand I		Zustand II		Zustand III	
	Simulation	Standartabw.	Simulation	Standartabw.	Simulation	Standartabw.
$D_{50}(3)$ [%]	13,3	2,8	16,8	3,9	30,7	5,8
$C_{80}(3)$ [dB]	-6,2	0,9	-5,0	0,9	-1,6	0,8
$G(3)$ [dB]	10,5	0,8	9,8	0,8	5,7	1,7
$T_s(3)$ [ms]	311	21	267	18	137	11

In Anbetracht der hohen Standardabweichung bei allen räumlich gemittelten Energiekriterien muss festgestellt werden, dass eine ausreichende Genauigkeit der Beschreibung der akustischen Verhältnisse allein auf Basis der gemittelten Energiekriterien nicht möglich ist. Für eine einfache Raumgeometrie, beispielsweise für Konzertsäle in der typischen “Schuhkartonform“, ist die Bildung eines Einzahlwertes möglich. Für die stark gegliederte Geometrie der “Himmelsburg, hervorgerufen durch die geringen Pfeilerabstände der Emporen, die kleinen Gewölbeflächen sowie des angekoppelten Raumvolumens der Musikerempore, müssten die Werte zumindest nach einzelnen Raumbereichen unterschieden werden. Da eine numerische Darstellung der so aufgeschlüsselten Ergebnisse schnell unübersichtlich wirkt, werden ausgewählte Energiekriterien in Form von Schallkarten erstellt. Durch das Simulationsprogramm werden diese Karten nur für die Oktavbandmittenfrequenzen ausgegeben, wobei die folgenden Darstellungen sich immer auf die Frequenz von 1000 Hz beziehen, da sich auch die Angaben der Optimalwerte der Energiekriterien lediglich auf diese Frequenz beschränken.

Die Auswertung anhand der Schallkarten erfolgt ausschließlich für den besetzten Zustand, da dieser die akustischen Eigenschaften bei Veranstaltungen wiedergibt. Die Schallkarten werden von dem Simulationsprogramm immer für den Grundriss ausgegeben. Damit alle Platzbereiche übersichtlich und auf einen Blick ausgewertet werden können, werden im Folgenden die übereinanderliegenden Emporen nebeneinander abgebildet und gekennzeichnet. Die Farbskala auf der rechten Seite der Abbildungen kennzeichnet den dargestellten Umfang des jeweiligen Energiekriteriums.

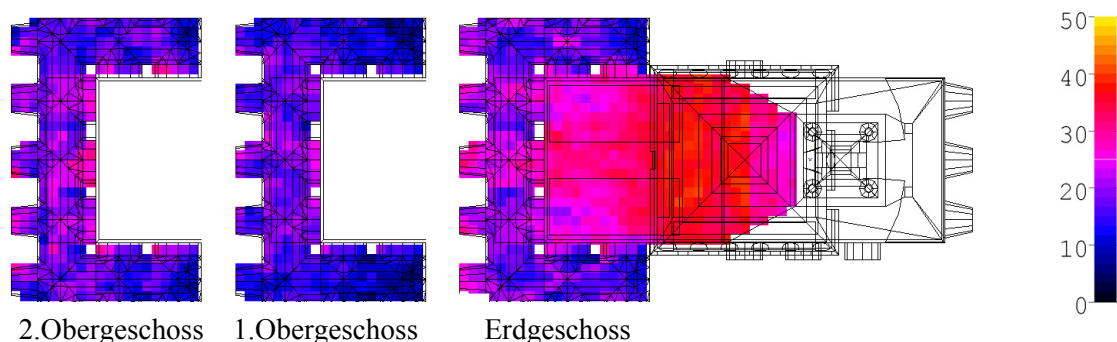


Abb. 5.16: Deutlichkeitsgrad D_{50} [%] – 1000 Hz, Schallanregung von der Kanzel, Zustand: besetzt

Bei der Schallanregung von der Kanzel werden alle Kriterien näher betrachtet, die für eine Bewertung der Sprachverständlichkeit relevant sind. Die Verteilung des Deutlichkeitsgrades D_{50} ist in Abb. 5.16 dargestellt. An den Farbverläufen ist erkenntlich, dass im Chorbereich und den vorderen Kirchenbänken auf Grund der seitlich eintreffenden Reflexionen von den Wänden eine gute Silbenverständlichkeit erreicht wird, aber auch auf den hinteren Sitzplätzen ist die Satzverständlichkeit – eine ausreichende Lautstärke vorausgesetzt – mit sehr gut zu bewerten. Auf den hinteren, seitlichen Plätzen in den Kirchenbänken sinkt allerdings die Verständlichkeit ab, da dieser Bereich nicht mehr durch seitliche Reflexionen von den Wandflächen versorgt werden konnte und somit zeitige, energiereiche Reflexionen, die den Direktschall unterstützen, fehlen. Unter den Emporen sinkt die Verständlichkeit, bis auf den zentralen Platz auf der Symmetrieachse, abrupt ab. Diese Werte liegen aber noch im Bereich einer guten Satzverständlichkeit. Auf der Empore des ersten Obergeschosses nimmt die Verständlichkeit weiter ab, lediglich der mittige Sitzplatz weist eine gute Satzverständlichkeit auf. Zu erkennen sind auch die schlechten Bedingungen an den Längsseiten, bei denen der Wert des Deutlichkeitsgrades gegen Null tendiert. Die Empore des zweiten Obergeschosses weist eine etwas bessere Verständlichkeit auf, was durch die dem Direktschall zeitig folgenden Reflexionen an der Decke zu begründen ist (Kap. 5.2.3, S. 132, Abs. 2). Besonders auf dem “Fürstenplatz“ war eine sehr gute Satzverständlichkeit vorhanden, wie sie nur auf den Plätzen der Kirchenbänke erreicht wurde.

An der Verteilung des Deutlichkeitsgrades ist zusätzlich der abschattende Effekt der Pfeiler gut zu erkennen. In den Zwischenräumen werden folglich bessere Werte erreicht als direkt hinter den Pfeilern. Diese Verteilung kann für die hier getroffene Auswertung als annähernd richtig simuliert betrachtet werden, da sich nur auf die Frequenz von 1000 Hz bezogen wird, die Beugungseffekte um die Pfeiler aber erst ab einer Frequenz von ca. 500 Hz in Erscheinung treten (Kap. 4.2.3, S. 84, Abs. 2).

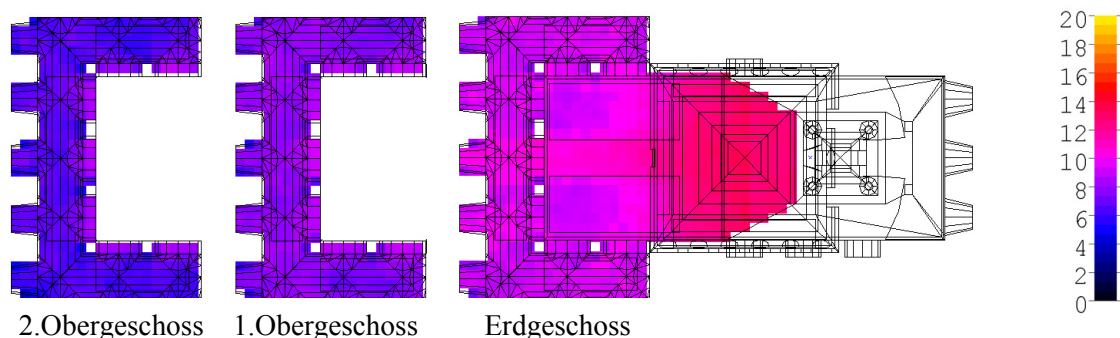


Abb. 5.17: Stärkemaß G [dB] – 1000 Hz, Schallanregung von der Kanzel, Zustand: besetzt

Das Stärkemaß G (Abb. 5.17) ist wesentlich gleichmäßiger im Raum verteilt als der Deutlichkeitsgrad. Auf den Kirchenbänken fällt in etwa die 10fache Schallenergie ein, wie sie im Freifeld in 10 m Entfernung auftreten würde, das der Verständlichkeit zuträglich ist. Auch auf den Plätzen der Emporen wird ebenfalls eine ausreichende Lautstärke erreicht, diese nimmt offensichtlich mit zunehmender Geschosshöhe ab. In Abb. 5.17 ist des weiteren die schallabsorbierende Wirkung des Publikums zu erkennen. Da sich der Schall flach über der besetzten Fläche ausbreitet, nimmt die Lautstärke über den Sitzplätzen schneller ab als auf dem Gang zwischen den Bänken.

In Abb. 5.18 wird die Schwerpunktzeit dargestellt. Es ist erkennbar, dass sich das Kirchenschiff deutlich von den Plätzen unter und auf den Emporen unterscheidet. Während auf den Kirchenbänken noch Werte erreicht werden, die musikalischen Aufführungen dienlich wären, ist die Schwerpunktzeit auf den Emporen erheblich länger. Für Sprache sind allerdings alle Werte viel zu hoch. Dies ist ein Resultat der für Sprachräume wesentlich zu langen Nachhallzeit, womit auch die Werte des Deutlichkeitsgrades zu erklären sind, die auf keinem Sitzplatz Werte über 50 % erreichen. Zusammenfassend wird festgestellt, dass auf den Kirchenbänken sowie auf dem Platz des Fürsten eine Predigt gut verfolgt werden konnte, während dies besonders auf den Längsemporen nur bedingt möglich war. Eine Voraussetzung für eine gute Verständlichkeit war allerdings eine angemessene Sprechweise des Geistlichen, da der Nachhall den Raum dominierte.

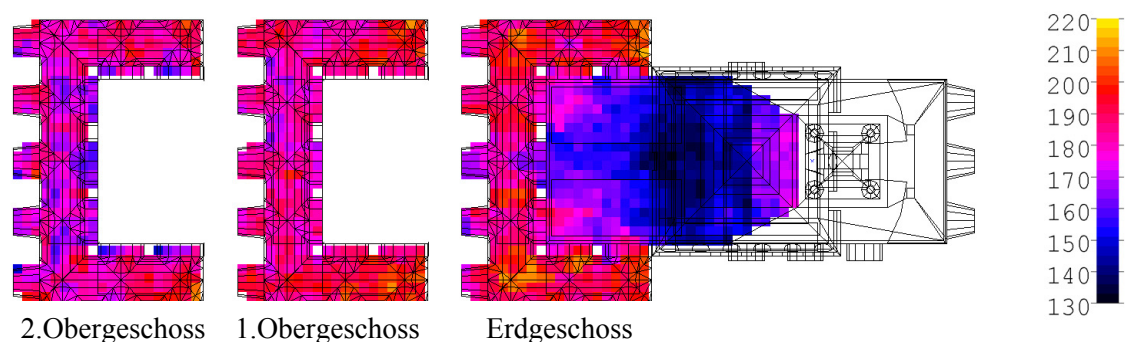


Abb. 5.18: Schwerpunktzeit T_s [ms] – 1000 Hz, Schallanregung von der Kanzel, Zustand: besetzt

Die akustischen Voraussetzungen der “Himmelsburg“ für musikalische Vorträge werden nach folgend für eine Schallanregung von der Musikerkapelle aus bewertet. Als ein Maß für die Durchsichtigkeit musikalischer Strukturen wird in Abb. 5.19 das Klarheitsmaß C_{80} dargestellt. Im Gegensatz zu dem Deutlichkeitsmaß bei einer Schallanregung von der Kanzel aus, sind die Werte im Kirchenschiff sehr gleichmäßig verteilt. Der Grund dafür liegt in der Schalleinfallrichtung. Während von der Kanzel aus die Entfernung zur Schallquelle in Richtung der hinteren Kirchenbänke immer mehr zu- und damit der Einfluss des Direktschalls abnimmt, ist die Entfernung von der Orgel zu allen Plätzen aus in etwa gleich groß. Damit hat auch die Schallpegelabnahme infolge der Publikumsabsorption keinen Einfluss auf das Klangerlebnis, da der Schall von oben alle Plätze ungehindert erreichen kann.

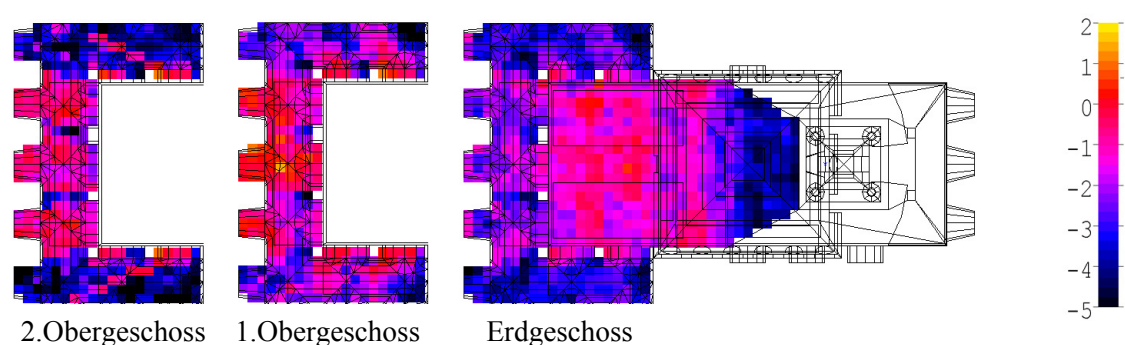


Abb. 5.19: Klarheitsmaß C_{80} [dB] – 1000 Hz, Schallanregung von der “Capella“, Zustand: besetzt

Das Klarheitsmaß nimmt im Kirchenschiff Werte von ca. -2 dB bis 0 dB an. Damit wird ein klares Klangbild erreicht. Im Chorbereich und unterhalb der Emporen fallen die Werte allerdings abrupt ab. Der Grund dafür ist die fehlende Direktschallversorgung dieser Bereiche. Der

Chorbereich wird durch die Decke im zweiten Obergeschoss abgeschattet, allerdings könnten in der realen Schlosskapelle bei tiefen Frequenzen gebeugte Schallwellen für etwas bessere Werte gesorgt haben. Unter den Emporen resultieren die schlechten Werte aus der extrem steilen Schalleinfallrichtung. Die Pfeiler behindern in diesem Fall nicht nur durch ihren Querschnitt die Ausbreitung des Schalls, sondern auf ihrer gesamten Höhe gelangen keine Strahlen unter die Emporen. Aus diesem Grund wird das Schallfeld unterhalb der Emporen durch Reflexionen höherer Ordnung bestimmt, die einen wesentlich geringeren Energieanteil besitzen. Infolge dessen tritt in der Abbildung des Klarheitsmaßes (Abb. 5.19) auch die abschattende Wirkung der Pfeiler wesentlich stärker hervor als in der Darstellung des Deutlichkeitsgrades (Abb. 5.16) bei frontal einfallendem Schall.

Bei der Bewertung der raumakustischen Qualität in Bezug auf die Sitzplätze der Emporen treten wesentliche Unterschiede zwischen den Querseiten und den Längsseiten der Emporen auf. Während die Längsseiten beider Geschosse eher mit mangelhaft zu bewerten sind, weisen die Querseiten, speziell die Plätze auf der Symmetrieachse, hervorragende Werte auf. Das Maximum im ersten Obergeschoss ist dadurch zu erklären, dass sich dieser Platz in einer Art Brennpunkt zwischen den Pfeilern befindet und so durch energiereiche Reflexionen an beiden Seitenflächen der Pfeiler versorgt wird. Auch um den Fürstenplatz im zweiten Obergeschoss werden noch Werte von über 0 dB erreicht. Die Durchsichtigkeit war damit besonders auf den Querseiten der Emporen und im Kirchenschiff für einen sakralen Raum sehr hoch und musikalische Strukturen konnten gut unterschieden werden.

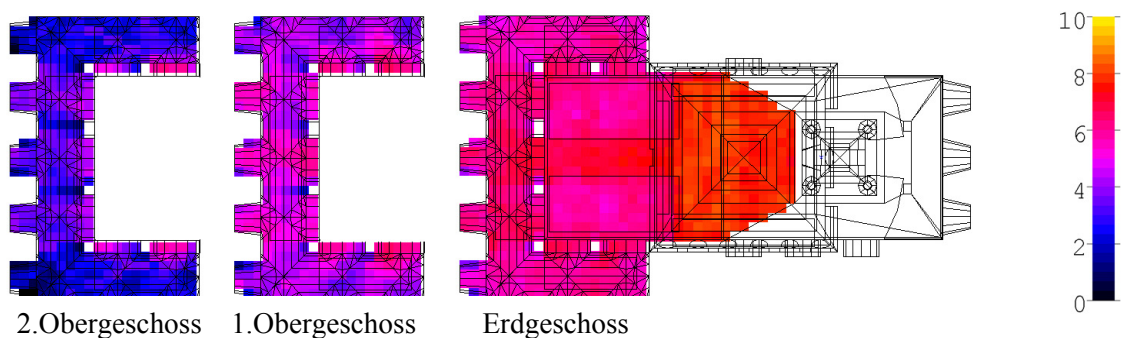


Abb. 5.20: Stärkemaß G [dB] – 1000 Hz, Schallanregung von der “Capella“, Zustand: besetzt

Das Stärkemaß G ist wesentlich gleichmäßiger im Raum verteilt als das Klarheitsmaß. Die höchste Lautstärke wird im Kirchenschiff erreicht und nimmt, wie bei einer Schallanregung von der Kanzel, mit zunehmender Geschosshöhe ab. Auf der ersten Empore und im Kirchenschiff wird mit +5 dB bis +8 dB eine ausreichende Lautstärke erzielt, während auf der obersten Empore mit ca. 3 dB nur eine relativ geringe Lautstärke vorhanden ist.

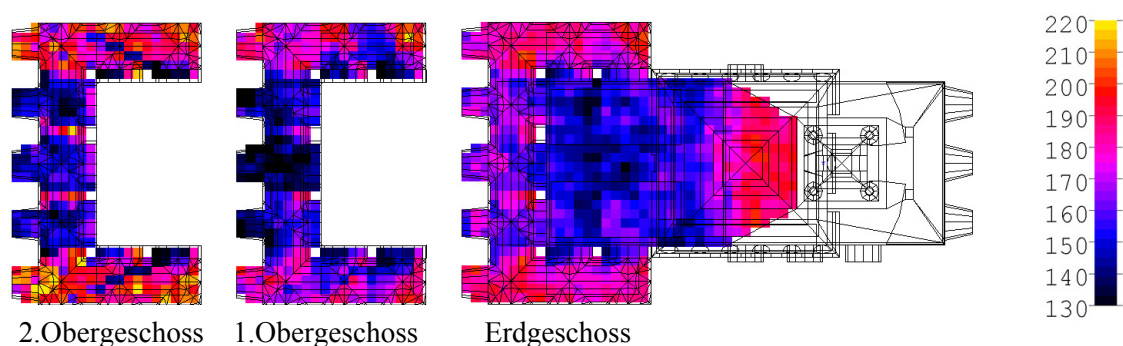


Abb. 5.21: Schwerpunktzeit T_s [ms] – 1000 Hz, Schallanregung von der “Capella“, Zustand: besetzt

Die Verteilung der Schwerpunktzeit folgt der des Klarheitsmaßes und lässt damit ähnliche Schlussfolgerungen zu. Auf dem gesamten Sitzplatzbereich im Erdgeschoss werden durchgehend gute Werte von 130 ms bis 150 ms erreicht, die eine gute Durchsichtigkeit musikalischer Strukturen ermöglichen. Unter den Emporen steigen die Werte besonders auf den Längsseiten stark an, so dass teilweise über 200 ms erreicht werden, wodurch musikalische Strukturen verschwimmen. Ähnlich verhält es sich auf den Emporen. Die Längsseiten weisen eine hohe Schwerpunktzeit auf, die der Klarheit eines Musikstückes beeinträchtigen. Die Querseiten beider Emporen erreichen dagegen gute Werte, wobei der Platz auf der Symmetrieachse im ersten Obergeschoss aus akustischen Gesichtspunkten am Besten zu bewerten ist.

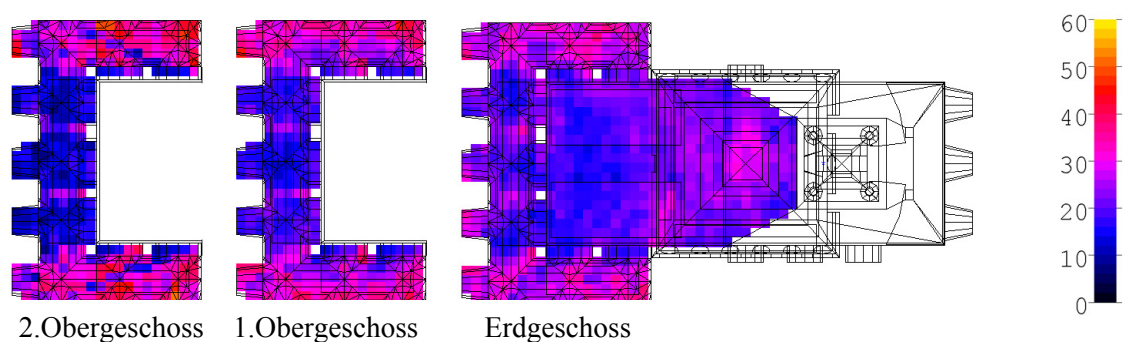


Abb. 5.22: Seitenschallgrad LF [%] – 1000 Hz, Schallanregung von der “Capella“, Zustand: besetzt

Durch den Seitenschallgrad LF wird der Raumeindruck beschrieben, der besonders für die Charakterisierung der subjektiv empfundenen Klangwirkung von musikalischen Darbietungen von Bedeutung ist. Klassische Konzerträume mit schmalen Abmessungen (Wiener Musikvereinssaal etc.) verdanken beispielsweise ihre gute Akustik teilweise den vor den Decken-

reflexionen eintreffenden Reflexionen an den Seitenwänden, wodurch der Klang an Volumen gewinnt. In der „Himmelsburg“ ist die Untersuchung des Seitenschallgrades von besonderem Interesse, da frühe Deckenreflexionen bei einer Schallanregung von der Musikerempore nicht auftreten können. Bei der Auswertung der Schallkarten muss dabei beachtet werden, dass die Messpositionen in Richtung der Schallquelle ausgerichtet sind und nicht entlang der Symmetrieachse. Die Achse für den Seitenschallgrad dreht sich demzufolge um die Lage der Schallquelle.

Die Verteilung des Seitenschallgrades in der „Himmelsburg“ zeigt Abb. 5.22. Deutlich werden dabei wieder die prinzipiell zu unterscheidenden Bereiche – die längsseitigen Emporen und der Kirchenraum inklusiver der Emporen an den Querseiten. Letztere weisen durchgehend einen mittleren Seitenschallgrad von 10 % bis 20 % auf, während an den Längsseiten der Emporen höhere Werte erreicht werden. Die seitlichen Reflexionen hatten damit keinen starken Einfluss auf das räumliche Klangbild. Das Gefühl des „Eingehülltseins“ in den Raumklang, und damit in das musikalische Geschehen, wird damit vordergründig durch den Nachhall bestimmt.

Die Energiekriterien bestätigen damit die Auswertung der Nachhallzeit. Infolge des für barocke Kirchen typischen Frequenzverlaufes war die Schlosskapelle für musikalische Veranstaltungen besser geeignet als für Sprachdarbietungen. Besonders da der für das Verstehen von Sprache relevante Formantenbereich durch die längere Nachhallzeit bei tiefen Frequenzen verdeckt wurde [Mey 03, S.154]. Der Anstieg der tiefen Frequenzen war allerdings so gering, dass bei einem Sprecher auf der Kanzel ein Vortrag in angemessener Sprechweise vom Kirchenschiff aus gut verfolgt werden konnte, während die Emporenplätze etwas schlechtere Voraussetzungen hatten.

Die akustische Eignung für musikalische Darbietungen zeigte sich besonders bei der Schallanregung von der Musikerempore aus. Im Kirchenschiff stellte sich ein Schallfeld ein, das dem kirchlichen Charakter nachkam sowie eine hohe Durchsichtigkeit bei schnellen Artikulationen zuließ. Während die Emporenplätze der Längswände akustisch ungeeigneter waren, ist auf den Emporen der Querseite ebenfalls ein klares und durchsichtiges Klangbild vorhanden gewesen, das sich im ersten Obergeschoss in den Bereich der Optimalwerte von Konzertsälen einordnen lässt.

6 Fazit

Die Weimarer Schlosskapelle, wie sie zwischen 1658 und 1774 existierte, weist signifikante Merkmale frühbarocker sowie protestantischer Raumvorstellungen auf. Das markanteste Merkmal barocker Baukunst ist die unbedingte Symmetrie, die in der “Himmelsburg“ durch die Anordnung von Blendtüren und Scheinfenstern ihren Höhepunkt findet. Die strukturierten Pilaster und Pfeiler sowie die Gesimsbänder begünstigten diffuse Reflexionen und damit den Aufbau eines gleichmäßig verteilten Schallfeldes. Die Reformation spiegelt sich vor allem in den umlaufenden Emporen der beiden Obergeschosse wider sowie in der Zentralisierung des Raumes. Altar und Kanzel bildeten eine zentrale Einheit. Die Emporen ermöglichten eine gute Sicht auf den Geistlichen und förderten damit eine gute Verständlichkeit der Predigt. Zudem begünstigten sie diffuse Schallreflexionen durch ihre raumstrukturierende Wirkung. Der nach liturgischen Anforderungen gestaltete Kanzelaltar erhöhte die Sprecherposition, so dass im Kirchenschiff sowie auf den Emporen eine gute Satzverständlichkeit erreicht wurde. Durch seine Form und Konstruktion wirkte er – wie die Empore hinter dem Altar sowie die Holzböden der umlaufenden Emporen – als ausgesprochener Tiefenabsorber.

Die musikalische Umrahmung des Gottesdienstes fand von einer kuppelüberdachten Empore oberhalb des Kirchschiffes statt, die gleichzeitig der Aufnahme der Orgel diente. Aus welchen Gründen diese architektonische Besonderheit nachträglich in den Kirchenraum integriert wurde, ist heute nicht mehr nachweisbar.

Die Grundlage für die akustische Simulation der Schlosskapelle bildet die architektonische Rekonstruktion. Auf Grund der fundierten Quellenlage, betreffend der Schlossgeschichte und dem baulichen Zustand zwischen 1658 und 1774, konnte die Geometrie der “Himmelsburg“ sehr zuverlässig ermittelt werden. Die Kenntnisse über verwendete Materialien basieren überwiegend auf der Untersuchung traditioneller Baukonstruktionen und den in der Entstehungszeit zur Verfügung stehenden Baustoffen. Die Zuweisung von zugehörigen Absorptionseigenschaften ist aus diesem Grund weniger zuverlässig als die Raumgeometrie es war, zumal für die historischen Baustoffe keine Angaben in der Fachliteratur vorhanden waren. Schwieriger gestaltete sich die Zuordnung von Streueigenschaften, da nur Schätzwerte in der Literatur angegeben wurden.

Die Untersuchung der Raumgestaltung hat ergeben, dass der prozentuale Anteil der Wandflächen an der Gesamtbegrenzungsfläche so hoch ist, dass die Putzflächen das dominante Material darstellen, für das die angenommenen Eigenschaften als gesichert angesehen werden können.

Die akustische Qualität der Weimarer Schlosskapelle ordnet sich nach den Simulationsergebnissen in den baustiltypischen Bereich barocker Kirchen ein. Die Länge der mittleren Nachhallzeit als wesentlichstes raumakustisches Bewertungskriterium wird als typisch für Kirchenräume empfunden. Der spektrale Verlauf weist eine Abnahme zu tiefen Frequenzen auf, die als charakteristisch für barocke Kirchen gilt. Die Untersuchung der verschiedenen Platzbereiche hat ergeben, dass eine ausreichende Sprachverständlichkeit vorhanden ist und ein Vortrag in angemessener Sprechweise und deutlicher Artikulation gut verfolgt werden konnte. Besser hingegen eignete sich die Schlosskapelle für musikalische Darbietungen bei einer Schallanregung von der Musikkapelle. Dabei wurde besonders im Kirchenschiff und den Emporen der Querseiten ein klares Klangbild erreicht, so dass auch bei einer schnellen Artikulation musikalische Strukturen gut verfolgt werden konnten. Die Durchsichtigkeit des Klangbildes erreicht teilweise Werte, die sich in den Bereich der für gut empfundenen Optimalwerte für Konzertsäle einordnen lassen. Im Vergleich mit anderen barocken Kirchen, die im besetzten Zustand einen nahezu frequenzneutralen Verlauf der Nachhallzeit aufweisen, wird durch den leichten Anstieg zu tiefen Frequenzen im besetzten Zustand eine geringere Deutlichkeit erreicht. Allerdings resultiert aus diesem Anstieg ein wärmeres Klangbild und die sakrale Atmosphäre des Kirchenraumes bleibt bewahrt.

Für eine detailliertere Untersuchung der vorliegenden Ergebnisse sollte speziell die Auswirkung der Materialparameter überprüft werden. Besonders die Wahl der Streueigenschaften kann präziser an die Oberflächenstruktur der verschiedenen Materialien angepasst werden, in dem für unterschiedliche Details zugehörige Streuwerte in Abhängigkeit der Strukturtiefe abgeschätzt werden. Auch die Wahl einiger Absorptionswerte ist mit Unsicherheiten behaftet, deren Einfluss auf die akustische Qualität der Simulationsergebnisse näher zu überprüfen wäre.

Eine Möglichkeit, die gewonnenen Erkenntnisse der akustischen Situation der Weimarer Schlosskapelle fortführend zu analysieren, stellt die Durchführung einer Auralisation dar. Mittels rechen technischer Verfahren kann durch die Verwendung eines hallfreien Musikstückes die akustische Wahrnehmung an einzelnen Platzbereich hörbar gemacht werden. Um beispielsweise das Erleben der von Bach für die "Himmelsburg" komponierten Musik richtig zu auralisieren, ist nicht nur ein ausreichendes Wissen über die Geometrie der Schlosskapelle, der verwendeten Materialien und eine genaue Kenntnis von Wand- und Deckenaufbauten notwendig, sondern auch die Konstruktion der damals verwendeten Musikinstrumente spielt eine bedeutende Rolle. Neben der Abstrahlcharakteristik hat die Stärke der Schallabstrahlung und vor allem die Klangfarbe, dass heißt die spektrale Zusammensetzung eines gespielten Tones, einen wesentlichen Einfluss.

A Literaturverzeichnis

Bücher und Zeitschriften:

- [Ahn 80] Ahnert, Wolfgang; Schmidt, Wolfgang: *Akustik in Kulturbauten*, Berlin: DEWAG, 1980
- [Arn 04] Arnold, Jörg: *Untersuchung der raumakustischen Eigenschaften von Atrien*, Weimar: Studienarbeit, 2004
- [Ber 04] Beranek, Leo Leroy: *Concert halls and opera houses – Music Acoustics and Architecture*, Second Edition, New York: Springer, 2004
- [Ber 90] *Bertelsmann Universallexikon*, Gütersloh: Bertelsmann Lexikon Verlag, 1990
- [Bob 90] Bobran, Hans Werner; Bobran, Ingrid: *Handbuch der Bauphysik: Berechnungs- und Konstruktionsunterlagen für Schallschutz, Raumakustik, Wärmeschutz, Feuchteschutz*, 6. Auflage, Braunschweig: vieweg, 1990
- [Bor 00] Bork, Ingolf: *Raumsimulationsprogramme in der Praxis*, In: Fortschritte der Akustik – DAGA 00, Oldenburg: Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., 2000
- [Bor 02] Bork, Ingolf: *Ringvergleich zur Raumakustischen Simulation*, In: Fortschritte der Akustik – DAGA 02, Oldenburg: Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., 2000
- [Bot 00] Bothe, Rolf: *Dichter, Fürst und Architekten: das Weimarer Residenzschloss vom Mittelalter bis zum Anfang des 19. Jahrhunderts*, Ostfildern-Ruit: Hatje Cantz, 2000
- [Cat 02] Programmhandbuch: *CATT-Acoustic v8.0 User's Manual*, Gothenburg: Spectra D'Sign Kopiering AB, 2002
- [Clo 91] Clowney, Paul; Clowney Tessa: *Kirchen entdecken. Ein Bildführer durch 2000 Jahre Kirchenbau*, Wuppertal: Brockhaus, 1991
- [Fas 98] Fasold, Wolfgang; Veres, Eva: *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, Berlin: Verl. für Bauwesen, 2003
- [Gom 02] Gomes, Marcio Henrique de Avelar, Vorländer, Michael, Gerges, Samir Nasir Yousri: *Anforderungen an die Probeflächen bei der Messung des Streugrades im Diffusfeld*, In: Fortschritte der Akustik – DAGA 02, Oldenburg: Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., 2002
-

-
- [Gra 82] Grassnick, Martin: *Die Architektur der Neuzeit - Bd.3: Materialien zur Baugeschichte*, Braunschweig: vieweg, 1982
- [Gru 86] Grube, Gert-Rainer: *Bauformen von der Romantik bis zur Gegenwart*, Berlin: Verlag für Bauwesen, 1986
- [Hen 99] Henn, Hermann; Sinambari, Gholam Reza; Fallen, Manfred: *Ingenieurakustik – Grundlagen, Anwendungen, Verfahren*, 2. Auflage, Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg, 1999
- [Hys 96] Hyss, Lothar: *Der Wiederaufbau des Weimarer Residenzschlosses in den Jahren 1789 – 1803: unter besonderer Berücksichtigung des Beitrages von Heinrich Gentz*, Weimar: VDG, Verlag und Datenbank für Geisteswiss., 1996
- [Ign 02] Ignasiak, Detlef: *Zum 400. Geburtstag des katholischen Universalgelehrten Athanasius Kircher*, In: Palmbaum: literarisches Journal aus Thüringen 10 (2002), S. 158 - 161, Bucha: Quartus-Verlag
- [Jac 98] Jacobsen, Roswitha: *Residenz-Schlösser in Thüringen*, Bucha bei Jena: quartus-Verlag, 1998
- [Jac 99] Jacobsen, Roswitha: *Residenzkultur in Thüringen vom 16. bis zum 19. Jahrhundert*, Bucha bei Jena: quartus Verlag, 1999
- [Jun 85] Jung, Hans Rudolf: *Johann Sebastian Bach in Weimar, 1708 bis 1717*, Tradition und Gegenwart, Weimarer Schriften Heft 16, Weimar: Druckhaus Weimar, 1985
- [Kir 02] Kirchner, Tobias: *Erfassung und Darstellung der Möglichkeiten zur raumakustischen Analyse von Räumen definierter Akustik*, Studienarbeit an der Bauhaus-Universität Weimar, 2002
- [Kir 84] Kircher, Athanasius: *Athanasii Kirchers Neue Hall- und Thon-kunst*, Übersetzung des Originals "Phonurgia Nova" von Agathus Carion, NRepr. nach dem Original aus Nördlingen von 1684, Hannover: Edition "libri rari", Thomas Schäfer, 1983
- [Met 96] J.B. Metzler: *Das neue Lexikon der Musik*, Stuttgart-Weimar: Metzler-Verlag, 1996
- [Mey 03] Meyer, Jürgen: *Kirchenakustik*, Frankfurt a.M.: Verlag Erwin Bochinsky, 2003
- [Mom 00] Mommertz, Eckard: *Messung, Modellierung und Einsatz der Schallstreuung in der raumakustischen Planungspraxis*, In: Fortschritte der Akustik – DAGA 00, Oldenburg: Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., 2000
- [Rei 79] Reichardt, Walter: *Gute Akustik – aber wie? Gespräche eines Experten für Raumakustik mit Konzert- und Theaterbesuchern, Dirigenten, Schallplattenfreunden, Architekten und Tontechnikern*, Berlin: VEB Verlag Technik, 1979
- [Röm 81] Römer, Christel; Dieterle, Reinhard; Fletcher, John; Reiß, Wolfgang; Römer, Gerhard; Scharlau, Ulf: *Universale Bildung im Barock: der Gelehrte Athanasius Kircher*, eine Ausstellung der Stadt Rastatt in Zusammenarbeit mit der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe, Rastatt: Stadt Rastatt, 1981
- [Röm 94] Römer, Claus: *Schall und Raum: eine kleine Einführung in die Welt der Akustik*, Berlin, Offenburg: vde Verlag, 1994
-

-
- [Sch 01] Schmitz, O.; Vorländer, M.: *Grundlagen raumakustischer Rechenverfahren und ihre Validierung*, In: Fortschritte der Akustik – DAGA 01, Oldenburg: Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., 2001
- [Sch 04/1] Scharfe, Florian: *Rekonstruktion der Schlosskapelle im Weimarer Residenzschloss - Zustand 1658 – 1774, Teil 1*, Weimar: Studienarbeit, 2004
- [Sch 49] Scheidig, Walther: *Das Schloss in Weimar*, 1949
- [Ste 97] Stein, Jürgen A.: *Physik für Bauingenieure – Grundlagen und Anwendungen, Band 1 – Schall*, Hamburg: AVH, 1997
- [Ten 02] Tennhardt, Hans-Peter: *Sommersaal im Bosehaus des Bach-Archivs Leipzig*, Berlin: IEMB an der TU Berlin, Bericht Nr. 2 – 62/2002, 2002
- [Ull 02] Ullmann, Dieter: *Athanasius Kircher und die Akustik der Zeit um 1650: Zum 400. Geburtstag des Gelehrten am 2. Mai 2002*, In: N.T.M.: internationale Zeitschrift für Geschichte und Ethik der Naturwissenschaften, Technik 10 (2002), S. 65-77, Basel: Birkenhäuser
- [Vor 89] Vorländer, Michael: *Untersuchung zur Leistungsfähigkeit des raumakustischen Schallteilchenmodells*, Duisburg-Hamborn: Dissertation, 1989
- [Wei 02] Weinzierl, Stefan: *Beethovens Konzerträume - Raumakustische und symphonische Aufführungspraxis an der Schwelle zum modernen Konzertwesen*, Frankfurt a.M.: Verlag Erwin Bochinsky, 2002
- [Wex 84] Wex, Reinhold: *Ordnung und Unfriede. Raumprobleme des protestantischen Kirchenbaus im 17. und 18. Jh. In Deutschland*, Marburg: Jonas, 1984
-

Internetseiten, online – Dokumente:

- [bac 04] Bach Archiv: *Sommersaal im Bacharchiv*, Bach-Archiv Leipzig
abgerufen: 22. September 2004
unter: http://www.bach-leipzig.de/main_deutsch/bacharchiv/
- [egg 99] Eggenschwiler, Kurt; Baschnagel, Karl: *Aktuelle Aspekte der Kirchenakustik*,
Vortrag an der ETH Zürich, Studiengang Architektur
erstellt: 23. September 1999
abgerufen: 30. November 2004
unter: <http://www.arch.ethz.ch/eggenschwiler/>
- [kun 05] kunstwissen.de: *Die Architektur des Barock (1600 – 1780)*
abgerufen: 17. Januar 2005
unter: http://www.kunstwissen.de/fach/f-kuns/a_neu/02.htm
- [heu 97] Heutschi, Kurt: *Geschichte der Akustik*, Vorlesungsmaterial der ETH Zürich, Institute for
Signal and Information Processing, WS 00/01
erstellt: 05. Dezember 1997
abgerufen: 12. November 2004
unter: http://www.isi.ee.ethz.ch/education/lectures/ak1/ak1_link/
- [ptb 04] Physikalisch-Technische Bundesanstalt: Homepage der Arbeitsgruppe Raumakustik,
Datenbank für Schallabsorptionswerte
erstellt: 09. September 2004
abgerufen: 30. November 2004
unter: <http://www.ptb.de>
- [sch 04/2] Schloss Heidecksburg: *Das Schallhaus von Schloss Heidecksburg in Rudolstadt*,
Thüringer Landesmuseum Heidecksburg
abgerufen: 11. August 04
unter: <http://www.thueringen.de/schloesser/schallhaus.htm>
- [sch 05] Scharfe, Florian: *Rekonstruktion der Schlosskapelle im Weimarer Residenzschloss -
Zustand 1658 – 1774, Teil2*, Weimar: Studienarbeit, 2005
abgerufen: 09. März 2005
unter: <http://www.uni-weimar.de/~scharfe1/schlosskapelle/>
-

Gespräche:

- [wer 04] Werner, Thomas; Rekonstrukteur, *Gespräch* vom 26.10.2004
- [wir 05] Wirth, Hermann; Universitätsprofessor am Lehrstuhl für Bauaufnahme und Denkmalpflege an der Fakultät Architektur der Bauhaus-Universität Weimar, *Gespräch* vom 26.01.2005
- [sch 04/3] Schneider, Sabine; Büro für Denkmalpflege Dr. Schneider und Küster, Friedrich-Ebert-Strasse 20, 04416 Markkleeberg, *Telefonat* vom 07.10.2004

Normen:

- DIN 1320 Akustik – Begriffe, 1997
- DIN 1332 Akustik – Formelzeichen, 1969
- DIN 45630 Grundlagen der Schallmessung – physikalische und subjektive Größen von Schall, 1971
- DIN 45641 Mittelung von Schallpegeln, 1990
- DIN EN 12354-6 Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften – Teil 6: Schallabsorption in Räumen, 2002
- DIN EN ISO 3382 Messung der Nachhallzeit von Räumen mit Hinweis auf andere akustische Parameter, 2000
- ISO 9613-1 Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors, Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere, 1993
- ISO 9613-2 Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren, 1999

B Abbildungsverzeichnis

2.1	Älteste Ansicht der Stadt Weimar mit "Schloss Hornstein", Kupferstich nach Johannes Wolf, 1569/70, mit Detailausschnitt, [Bot 00, S.12], [Jac 99, S.46]	8
2.2	Grundriss des Hornsteins und der Wilhelmsburg, [Bot 00, S.9]	9
2.3	Der Hornstein von Südosten, Kupferstich von Peter Ruddelstedt, 1552, [Bot 00, S.10]	10
2.4	Porträt des Herzogs Johann Ernst von Sachsen-Weimar, Gemälde von Christian Richter, um 1625, [Bot 00, S.11]	10
2.5	Giovanni Bonalino, Grundriss des Schlosses, um 1619 [Bot 00, S.14]	12
2.6	Das Weimarer Residenzschloss, Aquarell, unbekannt, nach 1730, [Sch 04/1, S.9]	13
2.7	Christian und Wilhelm Richter, Ansicht der Wilhelmsburg, um 1655, [Bot 00, S.20]	14
2.8	Johann Georg Schenk, Ansicht des Schlosses vor und nach dem Brand vom 6. Mai 1774, um 1775, [Bot 00, S.35]	14
2.9	Joh. Seb. Bach, Johann Ernst Rensch d.Ä., um 1715, [Jun 85]	22
2.10	Joh. Seb. Bach, Elias Gottlob Haussmann, 1746, [Jun 85]	22
2.11	Versuchsanordnung zur mehrfachen Echobildung, Athanasius Kircher, [Kir 84, S.35]	26
2.12	Geometrische Strahlenverfolgung bei der Anwendung von optischen Geräten nach Athanasius Kircher, [Röm 81, S.83]	27
2.13	Modell einer Abhöranlage und Darstellung der fokussierenden Wirkung gewölbter Decken nach Athanasius Kircher, [Röm 81, S.87]	28
3.1	Grundrisse nach Weidner, um 1750, [Bot 00, S. 122/123]	40
3.2	Schloss Neu-Augustusburg in Weißenfels, Zustand 2004, [Sch 04/1, S.17]	41
3.3	Grundriss Schloss Neu-Augustusburg, 1976, [Sch 04/1, S.12]	41
3.4	Kanzelaltar der Tiefurter Dorfkirche, 2004, [Sch 04/1, S.20]	42
3.5	Rekonstruktion der "Himmelsburg", Grundriss Erdgeschoss, [Sch 04/1]	43
3.6	Rekonstruktion der "Himmelsburg", Grundriss 1.Obergeschoss, [Sch 04/1]	44
3.7	Rekonstruktion der "Himmelsburg", Grundriss 2.Obergeschoss, [Sch 04/1]	45
3.8	Rekonstruktion der "Himmelsburg", Grundriss Dachgeschoss, [Sch 04/1]	46
3.9	Schlosskapelle der "Wilhelmsburg", Aquarell, unbekannt, um 1730, [Sch 04/1, S.9]	46

3.10	Johann Moritz Richter, Längsschnitt der Schlosskirche, um 1655, [Bot 00, S.118]	47
3.11	Giovanni Bonalino, Wandaufriss der Schlosskirche, um 1620, [Bot 00, S.17]	47
3.12	Rekonstruktion der "Himmelsburg", Längsschnitt, [Sch 04/1]	48
3.13	Rekonstruktion der "Himmelsburg", Querschnitt, [Sch 04/1]	49
3.14	Christian Richter, Schlosskirche in Weimar, um 1660, [Jun 85, S.22]	50
3.15	Blick seitlich von der Empore im ersten Obergeschoss, virtuelles Bild, [sch 05]	51
3.16	Blick von der Chorschranke Richtung Eingang, virtuelles Bild, [sch 05]	51
3.17	Blick von der "Capella" Richtung Kanzelaltar, virtuelles Bild, [sch 05]	52
3.18	Blick von der "Capella" Richtung Langhaus, virtuelles Bild, [sch 05]	52
3.19	Fußbodenaufbau im Langhaus	54
3.20	Fußbodenaufbau Chorbereich	54
3.21	Kreuzgradgewölbe unter den Emporen, virtuelles Bild [sch 05]	55
3.22	Konstruktive Ausbildung der Gewölbe	55
3.23	Konstruktive Ausbildung der Decke über dem Kirchenschiff	56
3.24	Angenommene Konstruktion der Kuppel des Kapellenraumes, [wer 04]	57
3.25	Bach gibt ein Konzert in der "Capella", 1714, [Sch 04/1, S.10]	58
3.26	Fenster zu benachbartem Raum, Tür zum Treppenhaus, virtuelle Bilder [sch 05]	58
3.27	Sicht auf die Orgel in der "Capella", virtuelles Bild, [sch 05]	59
3.28	Angenommenes Kirchengestühl, virtuelles Bild, [sch 05]	60
3.29	Bestuhlung der Schlosskapellen Weißenfels und Gotha, [sch 04/1]	61
3.30	Palmensäule des Tiefurter Kanzelaltars, [sch 04/1, S.21]	61
3.31	Säulengetragener Pyramidenkanzelaltar der "Himmelsburg", virtuelles Bild, [sch 05]	62
4.1	Subjektive und objektive Bewertungskriterien, [Kir 02, S.15]	65
4.2	Schematisierter Schalldruckpegelverlauf eines Nachhallvorgangs [Arn 04, S.52]	67
4.3	Optimale mittlere Nachhallzeit T_{mid} in Abhängigkeit des Raumvolumens für verschiedene Nutzungsarten, [Fas 98, S.139]	70
4.4	Bereich optimaler Nachhallzeiten in Abhängigkeit der Frequenz, [Fas 98, 139]	71
4.5	Optimale Nachhallzeiten im mittleren Frequenzbereich für Kirchen, [Mey 03, S.146]	72
4.6	Schematisierte Raumimpulsantwort, [Fas 98, S.149]	73
4.7	Schallenergiebilanz an einer Wand, [Hen 99, S.233]	80
4.8	Reflexionswirkung einer Fläche in Abhängigkeit der Wellenlänge λ , [Fas 98, S.104]	81
4.9	Anwendungsbereich der Kantenbeugung, [Cat 02, S.2-74]	85
4.10	Blick in den Sommersaal während der Messdurchführung	91
4.11	Blick von der Schallkammer durch die Deckenöffnung in den Sommersaal	92
4.12	Grundriss des Sommersaales im Bosehaus mit Lage der Messpositionen	94
4.13	Grundriss des Galeriegeschosses über dem Sommersaal mit Lage der Messposition	95
4.14	Konstruktive Ausbildung der Längswände der Musikerempore	95

4.15	Längsschnitt des Sommersaales	96
4.16	3D-CAD-Modell des Sommersaales	97
4.17	Visualisiertes Berechnungsmodell des Sommersaales	98
4.18	Raumimpulsantwort des Raumes, Zustand III – Messposition 8	103
4.19	Echogramm der Simulation, Zustand III – Messposition 8, 1000 Hz	103
4.20	Raumimpulsantwort des Raumes, Zustand III – Messposition 1	104
4.21	Echogramm der Simulation, Zustand III – Messposition 1, 1000 Hz	104
4.22	Sommersaal, Zustand I: Nachhallzeit T_{30} aus Messung und Simulation	106
4.23	Sommersaal, Zustand II: Nachhallzeit T_{30} aus Messung und Simulation	107
4.24	Sommersaal, Zustand III: Nachhallzeit T_{30} aus Messung und Simulation	107
4.25	Sommersaal, WinMLS-Messung, 3 Messzustände, Anfangsnachhallzeit EDT	108
4.26	Sommersaal, CATT-Simulation, 3 Messzustände, Anfangsnachhallzeit EDT	108
4.27	Sommersaal, Zustand I: Klarheitsmaß C_{80} aus Messung und Simulation	109
4.28	Sommersaal, Zustand II: Klarheitsmaß C_{80} aus Messung und Simulation	109
4.29	Sommersaal, Zustand III: Klarheitsmaß C_{80} aus Messung und Simulation	110
5.1	Visualisiertes Berechnungsmodell: Explosionsdarstellung der einzelnen Geschosse	113
5.2	Sitzplatzbereich im Erdgeschoss	114
5.3	Sitzplatzbereich im 1. Obergeschoss	115
5.4	Sitzplatzbereich im 2. Obergeschoss	115
5.5	Bereich der von Musikern besetzten Fläche in der “Capella“	116
5.6	Stark diffus streuenden Flächen des Berechnungsmodells der “Himmelsburg“	122
5.7	Blick aus dem Erdgeschoss in Richtung “Capella“	130
5.8	Blick aus den Obergeschossen in Richtung “Capella“	131
5.9	Versorgung der Sitzplätze mit Direktschall	131
5.10	Ortung der Schallquellposition in Abhängigkeit des Hallradius	132
5.11	Einordnung der Nachhallzeit T_{mid} in den Bereich optimaler Nachhallzeiten	136
5.12	“Himmelsburg“, 3 Raumzustände, Nachhallzeit T_{30}	138
5.13	“Himmelsburg“, 3 Raumzustände, Anfangsnachhallzeit EDT	139
5.14	Vergleich der Nachhallzeiten historischer Kirchenbauten, unbesetzter Zustand	140
5.15	Vergleich der Nachhallzeiten historischer Kirchenbauten, besetzter Zustand	141
5.16	Deutlichkeitsgrad D_{50} [%] – Schallanregung von der Kanzel, Zustand: besetzt	144
5.17	Stärkemaß G [dB] – Schallanregung von der Kanzel, Zustand: besetzt	145
5.18	Schwerpunktzeit T_S [ms] – Schallanregung von der Kanzel, Zustand: besetzt	146
5.19	Klarheitsmaß C_{80} [dB] – Schallanregung von der “Capella“, Zustand: besetzt	146
5.20	Stärkemaß G [dB] – 1000 Hz, Schallanregung von der “Capella“, Zustand: besetzt	147
5.21	Schwerpunktzeit T_S [ms] – Schallanregung von der “Capella“, Zustand: besetzt	148
5.22	Seitenschallgrad LF [%] – Schallanregung von der “Capella“, Zustand: besetzt	148

E.1	Hörfeld des Menschen in Abhängigkeit von der Frequenz, [Arn 04, S.23]	E-14
E.2	Wichtige Frequenzbereiche der Akustik, in Anlehnung an [Fas 03, S.16]	E-15
E.3	Unterteilung der Frequenzleiter, in Anlehnung an [Hen 99, S. 54]	E-16
E.4	Mittelfrequenzen der Oktavleiter, in Anlehnung an [Hen 99, S.54]	E-16
E.5	Schallpegelabnahme durch Divergenz, in Anlehnung an [Ste 97, S.69]	E-20
E.6	Zeitlicher Auf- und Abbau des Schalldruckes im diffusen Schallfeld, [Arn 04, S.38]	E-23
E.7	Schallpegelverteilung in Abhängigkeit der Entfernung zur Schallquelle [Arn 04, S.31]	E-24

C Tabellenverzeichnis

4.1	Empfohlene Streugrade s	83
4.2	Messzustände im Bosehaus	93
4.3	Verwendete Absorptionsgrade α , Sommersaal	100
4.4	Verwendete Absorptionsgrade α , Musikerempore	100
4.5	Verwendete Streugrade s , Sommersaal und Musikerempore	101
4.6	Verwendeter Transmissionskoeffizient t , Musikerempore	101
4.7	Raumklima im Sommersaal	102
4.8	Vergleich zwischen Messung und Simulation anhand räumlich gemittelter Bewertungskriterien	105
5.1	Untersuchte Raumzustände der "Himmelsburg"	114
5.2	Absorptionsgrade α der Fußböden im Erdgeschoss	117
5.3	Absorptionsgrade α der Wandflächen	117
5.4	Absorptionsgrade α der Wand- und Deckenflächen aus Holzkonstruktionen	118
5.5	Absorptionsgrade α der Massivholzkonstruktionen	118
5.6	Absorptionsgrade α der Fenster	119
5.7	Absorptionsgrade α der Einrichtungsgegenstände	120
5.8	Absorptionsgrade α des Publikums	120
5.9	Verwendete Streugrade s , "Himmelsburg"	121
5.10	Verwendeter Transmissionskoeffizient t , "Himmelsburg"	123
5.11	Raumklima in der "Himmelsburg"	123
5.12	Verwendete Schallquellpositionen in der "Himmelsburg"	124
5.13	Verwendete Messpositionen in der "Himmelsburg"	125
5.14	Maßgebliche Flächen für die Absorption hoher Frequenzen	126
5.15	Maßgebliche Flächen für die Absorption tiefer Frequenzen	127
5.16	Gesamtabsorptionsgrad der "Himmelsburg"	127

5.17	Volumenkennzahl der “Himmelsburg“	129
5.18	räumlich gemittelte Nachhallzeit T_{30}	135
5.19	räumlich und spektral gemittelte Nachhallzeiten T_{low} , T_{mid} , T_{high}	135
5.20	Bassverhältnis BR	138
5.21	räumlich und spektral gemittelte Energiekriterien, Schallquellposition A	142
5.22	räumlich und spektral gemittelte Energiekriterien, Schallquellposition C	143
E.1	Normierte Bandmittenfrequenzen, in Anlehnung an [Fas 98, S. 17]	E-17
E.2	Frequenz und zugehörige Wellenlänge in Luft, in Anlehnung an [Mey 03, S. 14]	E-17

D Symbole

α	[%]	Schallabsorptionsgrad (absorption coefficients)
α_L	[dB/km]	Schallabsorptionskoeffizient der Luft
φ	[%]	Luftfeuchtigkeit
λ	[m]	Wellenlänge des Schalls
ϑ	[°C]	Temperatur
ρ	[kg/m ³]	Dichte
c	[m/s]	Schallgeschwindigkeit
f	[Hz]	Frequenz
e	[%]	Streugrad für Kantenbeugung (edge diffusion)
m	[1/m]	Schalldämpfungskoeffizient der Luft
r	[m]	Abstand vom Mittelpunkt einer Schallquelle r_H Hallradius
s	[%]	Streugrad (scattering coefficient)
p	[N/m ²]	Schallwechseldruck
t	[%]	Transmissionskoeffizient (transmission coefficient)

A	[m ²]	äquivalenten Schallabsorptionsfläche
		A_{ges} Gesamtabsorptionsfläche eines geschlossenen Raumes
		A_L äquivalenten Schallabsorptionsfläche der Luft
BR	[-]	Bassverhältnis
D_{80}	[dB]	Klarheitsmaß (clarity)
D_L	[dB]	Luftabsorptionsmaß, Dämpfungsmaß
D_{50}	[%]	Deutlichkeitsgrad (definition)
EDT	[s]	Anfangsnachhallzeit
I	[N/ms]	Schallintensität, Schallstärke
LF	[%]	Seitenschallgrad LF (lateral energy fraction)
		LFC einfallswinkelbewerteter Seitenschallgrad
L_p	[dB]	Schalldruckpegel
G	[dB]	Stärkemaß G (strength faktor)
T	[K]	Temperatur
T	[s]	Nachhallzeit
		T_{sab} Sabinesche Nachhallzeit
		T_{Eyr} Nachhallzeit nach Eyring
		T_{30} aus einem Pegelabfall um 30 dB ermittelte Nachhallzeit
T_s	[ms]	Schwerpunktzeit T_s (center time).
S	[m ²]	geometrische Fläche
V	[m ³]	Volumen
VK	[m ³ /Person]	Volumenkennzahl

E Anhang

E.1	Grundlagen des Schallfeldes	E-15
E.1.1	Schallfeldparameter	E-15
E.1.2	Frequenz und Wellenlänge	E-17
E.1.3	Schallgeschwindigkeit	E-20
E.2	Schallausbreitung im freien Schallfeld	E-22
E.2.1	Geometrische Ausbreitung	E-22
E.2.2	Dissipationsverluste an der Luftschicht	E-23
E.3	Schallausbreitung in geschlossenen Räumen	E-25
E.3.1	Diffuses Schallfeld	E-25
E.3.2	Nahfeld und Hallradius	E-26
E.3.3	Äquivalente Schallabsorptionsfläche	E-28
E.4	Messsystem “WinMLS 2000“	E-29
E.5	Referenzobjekt Sommersaal im Bosehaus	E-30
E.5.1	Grundriss unterer Saalbereich	E-31
E.5.2	Grundriss oberer Saalbereich	E-32
E.5.3	Längsschnitt Sommersaal	E-33
E.5.4	Querschnitt Sommersaal	E-34
E.6	“Himmelsburg“	E-35
E.6.1	Grundriss Erdgeschoss	E-36
E.6.2	Grundriss 1. Obergeschoss	E-37
E.6.3	Grundriss 2. Obergeschoss	E-38
E.7	Daten – CD	E-39

E.1 Grundlagen des Schallfeldes

E.1.1 Schallfeldparameter

Schall stellt eine mechanische Schwingung dar, die sich in einem elastischen Medium ausbreitet. Das Ausbreitungsmedium kann dabei gasförmig, flüssig oder fest sein. In der Raumakustik hat als Trägermedium die atmosphärische Lufthülle der Erde eine primäre Bedeutung. Da die Luft nur sehr kleine Schubkräfte übertragen kann, erfolgt die Fortpflanzung des Schalls nur in Form von Längswellen. Dabei entstehen Schwankungen des Luftdruckes (Verdichtung und Verdünnung der Luft), welche von dem menschlichen Ohr als Schall wahrgenommen werden [Hen 99, S.1].

Diese mehr oder weniger periodischen Druckschwankungen um den statischen Luftdruck werden mit Schallwechseldruck bezeichnet. Die Größe des Schallwechseldruckes ist eines der Kriterien für die empfundene Lautstärke. Das Hörfeld, der als Schall wahrnehmbaren Schallwechseldrücke, überstreicht einen Bereich von sechs Zehnerpotenzen (siehe Abb. E.1). Das menschliche Ohr kann aber nur zwischen 100 verschiedenen Lautstärkestufen unterscheiden [Ste 97, S.56]. Um den Bereich der Schallwechseldrücke überschaubarer zu gestalten und besser an den Gehörsinn anzupassen, wurde der Schallpegel eingeführt. Dieser ist als der 10-fache Logarithmus des Verhältnisses einer Leistungsgröße zu einer gleichartigen Bezugsgröße definiert [DIN 45 641].

Da es sich um das Verhältnis von zwei gleichen physikalischen Größen handelt, ist der Pegel dimensionslos. Damit eine Angabe sofort als Pegelwert erkannt werden kann, wurde die Bezeichnung "Bel" für ein logarithmiertes Verhältnis eingeführt. Der Schallpegel als 10-facher Logarithmus wird deshalb in Dezibel [dB] angegeben.

Im Vergleich zu dem statischen Luftdruck unserer Atmosphäre sind die Druckunterschiede eines Schallereignisses sehr gering. Die obere Grenze, deren Überschreitung zu stechenden Ohrenschmerzen und auch zu bleibenden Gehörschäden führen kann, ist die Schmerzschwelle. Bei einer Frequenz von 1000 Hz liegt sie bei ca. 100 N/m² [Hen 99, S.155]. Der kleinste, gerade noch vom menschlichem Gehörsinn wahrnehmbare Wechseldruck, die Hörschwelle, ist stark von der Frequenz abhängig. Bei 4000 Hz ist das Ohr mit einem Schwellenwert von 1·10⁻⁵ N/m² am empfindlichsten [Hen 99, S.155]. In der Abb. E.1 ist das gesamte Hörfeld des menschlichen Ohres dargestellt. Der Bereich der menschlichen Sprache sowie der Wiedergabebereich von musikalischen Darbietungen ist graphisch hervorgehoben, da diese Frequenzbereiche bei raumakustischen Betrachtungen von besonderem Interesse sind.

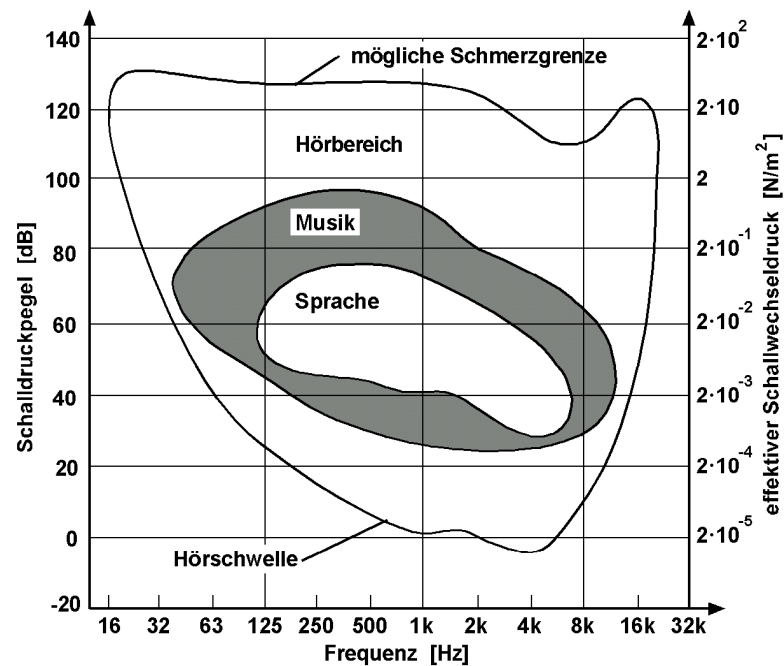


Abb. E.1: Hörfeld des Menschen in Abhängigkeit von der Frequenz, [Arn 04, S.23]

Hörschwelle	bei 1000 Hz:	p	$=$	$2 \cdot 10^{-4,8} \text{ N/m}^2$
	bei 2000 Hz:	p_0	$=$	$2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$
	bei 4000 Hz:	p	$=$	$1 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$

Schmerzschwelle:	p_{\max}	$=$	$1 \cdot 10^2 \text{ N/m}^2$
------------------	------------	-----	------------------------------

Zum Vergleich der atmosphärische Luftdruck:	p_{atm}	\approx	$2 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$
--	------------------	-----------	------------------------------

Als Bezugsgröße für die Berechnung des Schalldruckpegels wurde sich international auf die Hörschwelle bei 2000 Hz geeinigt [Hen 99, S.155]. Der Schalldruckpegel berechnet sich damit nach folgender Formel [Hen 99, S.72]:

$$\text{Schalldruckpegel: } L_p = 10 \cdot \lg \frac{p_{\text{eff}}^2}{p_0^2} [\text{dB}] = 20 \cdot \lg \frac{p_{\text{eff}}}{p_0} [\text{dB}]$$

E.1.2 Frequenz und Wellenlänge

Die kleinste Zeiteinheit in der sich ein bestimmter Schwingungszustand einer periodischen Schwingung wieder einstellt, ist die Periodendauer T , die in Sekunden angegeben. Aus dem Reziprokwert der Periodendauer ergibt sich die Anzahl der Schwingungen je Sekunde. Diese Größe ist die Frequenz f mit der Maßeinheit Hertz [$\text{Hz} = 1/\text{s}$]. Für periodische Druckschwankungen der Luft ist sie charakteristisch für die empfundene Tonhöhe eines Schallereignisses.

Aus diesem Grund wird in der Raumakustik nicht nur der zeitliche Verlauf eines Schallereignisses untersucht, sondern auch dessen spektrale Zusammensetzung. Relevant sind dabei nur die Frequenzen des menschlichen Hörbereichs im Spektrum von 16 Hz bis 20 kHz. Zugunsten einer besseren Übersichtlichkeit und in Anlehnung an das menschliche Hörvermögen wird dieses sehr breite Frequenzband logarithmisch eingeteilt. In der Abb. E.2 werden der menschliche Hörbereich und alle darin enthaltenen, für die Akustik relevanten Frequenzbereiche dargestellt. Um den umgekehrt proportionalen Zusammenhang zwischen Frequenz und Wellenlänge eines Tones zu verdeutlichen, wird neben der Frequenzachse der zugehörige Wert der Wellenlänge für eine Schallausbreitung in Luft bei einer Schallgeschwindigkeit von $c = 340 \text{ m/s}$ angegeben [Fas 98].

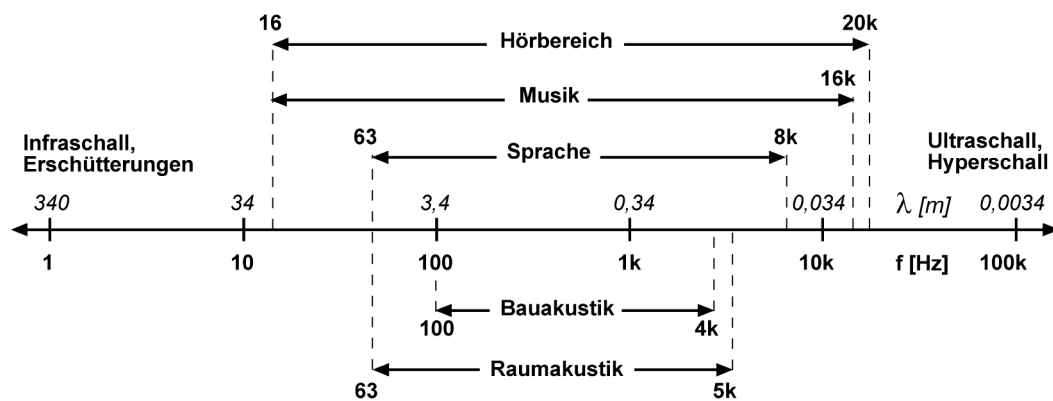


Abb. E.2: Wichtige Frequenzbereiche der Akustik, in Anlehnung an [Fas 03, S.16]

Für die spektrale Analyse eines Schallereignisses wird das Frequenzband in Intervalle unterteilt. Bei akustischen Untersuchungen dient überwiegend der Oktavschrift für die Unterteilung des Frequenzspektrums in Intervalle mit konstanter Bandbreite. Er entspricht einer Frequenzverdopplung und damit einer Halbierung der Wellenlänge. Eine feinere und auch häufig verwendete Einteilung ist der Terzschrift. Dieser teilt die Oktave nochmals logarithmisch in drei gleiche Teile.

Bei raumakustischen Untersuchungen werden Berechnungs- oder Messwerte immer für die Mittenfrequenz einer gewählten Bandbreite angegeben. Sie repräsentiert damit die ganze Bandbreite des untersuchten Intervalls, dass durch eine untere und eine obere Eckfrequenz begrenzt wird. Die Abb. E.3 zeigt in einer graphischen Darstellung die mathematische Unterteilung des Frequenzspektrums in Oktav- und Terzschrte.

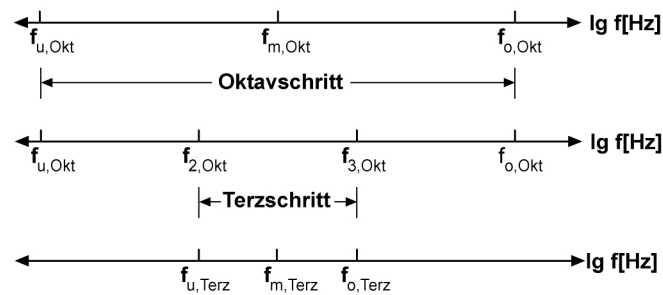


Abb. E.3: Unterteilung der Frequenzleiter, in Anlehnung an [Hen 99, S. 54]

Für die Unterteilung der Frequenzachse in konstante Bandbreiten muss eine Ausgangsfrequenz festgelegt sein. In der Akustik dient dafür eine standardisierte Mittenfrequenz von $f = 1000 \text{ Hz}$, von der sich alle anderen Mittenfrequenzen ableiten. Diese sind in der Tabelle E.1 für alle Terzbänder angegeben, die bei raumakustischen Untersuchungen relevant sind. Die Oktavbandmittenfrequenzen sind dick hervorgehoben. Die Abb. E.4 stellt die Mittenfrequenzen der Oktavleiter im Hörbereich auf einer Frequenzachse graphisch dar. Zur Veranschaulichung wird die Lage der Grundtöne c der Tonleiter gegenübergestellt.

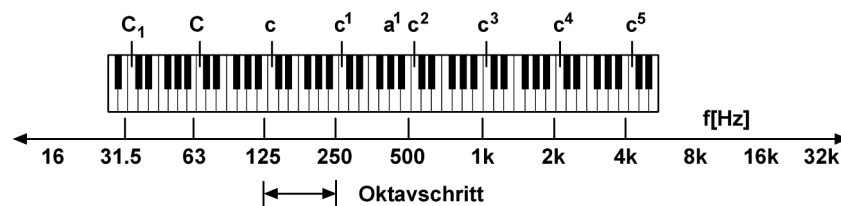


Abb. E.4: Mittenfrequenzen der Oktavleiter, in Anlehnung an [Hen 99, S.54]

Tabelle E.1: Normierte Bandmittenfrequenzen, in Anlehnung an [Fas 98, S. 17]

Normierte Band-Mittenfrequenzen f_m							
50	100	200	400	800	1600	3150	6300
63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
80	160	315	630	1250	2500	5000	10000

Die Frequenz f kennzeichnet den zeitlichen Abstand zwischen zwei gleichen Schwingungszuständen. Das Pendant für den räumlichen Abstand ist die Wellenlänge λ , die beispielsweise die Distanz zwischen zwei Druckmaxima charakterisiert. Je höher die Frequenz eines Schallereignisses ist, desto kürzer ist die Wellenlänge. Beide Größen sind demnach abhängig voneinander (siehe E.1.3 Schallgeschwindigkeit).

Nicht nur die Untersuchung der Frequenz als ein Kennzeichen der Tonhöhe ist bei raumakustischen Betrachtungen wichtig, sondern auch die Wellenlänge hat einen Einfluss auf das Schallfeld. Aus der Tabelle E.2, in der für einige Frequenzen die zugehörigen Wellenlängen des Schalls in Luft gegenübergestellt sind, wird der große Bereich der Wellenlängen im Hörbereich von wenigen Zentimetern bis einigen Metern deutlich. Die Wellenlänge hoher Frequenzen ist im Vergleich zu Abmessungen von Raumbegrenzungsflächen und baulichen Details, wie sie in der Raumakustik vorkommen, verhältnismäßig klein. Bei tiefen Frequenzen ist dagegen die Wellenlänge oftmals größer als die geometrische Abmessung einer typischen Reflexionsfläche, so dass verstärkt Welleneigenschaften des Schalls in Erscheinung treten, die das Schallfeld in erheblichen Maß beeinflussen.

Tabelle E.2: Frequenz und zugehörige Wellenlänge in Luft, in Anlehnung an [Mey 03, S. 14]

Frequenz f	[Hz]	20	100	1000	10000
Wellenlänge λ	[m]	17,0	3,4	0,34	0,034

E.1.3 Schallgeschwindigkeit

Bei der Ausbreitung von Wellen muss grundsätzlich zwischen zwei verschiedenen Geschwindigkeiten unterschieden werden. Mit Schallschnelle v (Teilchengeschwindigkeit) wird die Geschwindigkeit eines einzelnen schwingenden Teilchens (Luftmolekül) bezeichnet. Auf Grund der elastischen Kopplung zwischen den Teilchen wird die Bewegungsenergie auf die benachbarten Teilchen übertragen. Da die Bewegung der einzelnen Teilchen zeitlich zueinander versetzt ist, breitet sich die Schallwelle mit einer bestimmten Geschwindigkeit aus, der Schallgeschwindigkeit c . Diese ist von der Art und dem Zustand des Transportmediums, insbesondere von dessen elastischen Eigenschaften, abhängig [Fas 98, S.13].

Ein Einzelteilchen benötigt ein Zeitintervall von $\Delta t = T$ (T – Periodendauer), um eine volle Schwingung auszuführen. In dem gleichen Zeitintervall legt die Störung des Luftdruckes eine Wegstrecke von $\Delta x = \lambda$ (λ – Wellenlänge) zurück. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Störung – die Schallgeschwindigkeit – berechnet sich demnach mit [Hen 99, S.6]

$$c = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f \quad [\text{m/s}]$$

Auf den ersten Blick lässt diese Formel vermuten, dass die Schallgeschwindigkeit c von der Frequenz f des Schallereignisses abhängt. Die Geschwindigkeit des Schalls ist jedoch einzig von den Eigenschaften des Transportmediums abhängig und für alle Frequenzen gleich groß. Nur auf Grund dieser wesentlichen Eigenschaft ist es möglich, die Schallgeschwindigkeit unabhängig von der Frequenz anzugeben. In der Formel ist lediglich erkennbar, dass sich Frequenz und Wellenlänge umgekehrt proportional zueinander verhalten.

Die Schallgeschwindigkeit in Luft wird bei der Berechnung verschiedener akustischer Parameter benötigt und soll deshalb detailliert angegeben werden. In Luft, das heißt in Gasen, erfolgt die Ausbreitung des Schalls ausschließlich in reinen Längswellen. Bei diesen Longitudinal-, oder auch Dilatationswellen, entspricht die Schwingungsrichtung der Teilchen auch der Ausbreitungsrichtung der Welle. Die allgemeine Formel für Gase lautet [Ste 97, S.14]:

$$c = \sqrt{\frac{\kappa \cdot p}{\rho}} = \sqrt{\kappa \cdot R \cdot T}$$

κ	–	Adiabatexponent	
R	–	Gaskonstante	[Nm / kg·K]
p	–	Druck des Gases	[N/m²]
ρ	–	Dichte des Gases	[kg/m³]
T	–	Temperatur in	[K]

Für eine Ausbreitung des Schalls in der üblichen Atmosphärenluft können für die Gaskonstante und den Adiabatenexponent folgende Werte angenommen werden [Ste 97, S.14]:

$$\kappa = 1,403$$

$$R = 286,9 \quad [\text{Nm/kg}\cdot\text{K}]$$

Die Gleichung für die Schallgeschwindigkeit lässt sich damit so weit reduzieren, dass sie nur noch von der Umgebungstemperatur abhängig ist:

$$c = 20,063 \cdot \sqrt{T} \quad [\text{m/s}]$$

Wenn in der Formel die Temperatur in Grad Celsius verwendet werden soll, muss sie nochmals umgestellt werden. Für die Temperaturen $\vartheta = 0^\circ\text{C}$ und $\vartheta = 20^\circ\text{C}$ ergeben sich dann folgende Schallgeschwindigkeiten:

$$c \approx 331,6 \cdot \left(1 + \frac{0,5 \cdot \vartheta}{273\text{K}}\right) \quad \vartheta \text{ in } [^\circ\text{C}]$$

Schallgeschwindigkeit in Luft für:	$\vartheta = 0^\circ\text{C} = 273,15 \text{ K}$:	$c = 331,6 \text{ m/s}$
	$\vartheta = 20^\circ\text{C} = 293,15 \text{ K}$:	$c = 343,5 \text{ m/s}$

E.2 Schallausbreitung im freien Schallfeld

Das in der Umgebung einer Schallquelle aufgebaute Schallfeld ist zum einen von seinem Umfeld und zum anderen von der Schallquelle selbst abhängig. Grundsätzlich muss dabei die Schallausbreitung im Freien und in geschlossenen Räumen unterschieden werden. Der Schall pflanzt sich bekanntermaßen nicht unendlich in der Luft fort, sondern mit der Entfernung zum Schallereignis nimmt auch die Lautstärke ab. Der Schall wird demnach bei seiner Ausbreitung gedämpft. In der Raumakustik spielt dieser Effekt bei der Betrachtung des direkt von der Schallquelle zum Zuhörer laufenden Schalls ebenfalls eine Rolle. Da er denselben Gesetzen wie unter Freifeldbedingungen unterliegt, wird im folgenden von einem freien Schallfeld ausgegangen.

E.2.1 Geometrische Ausbreitung

Vorraussetzung für die folgenden theoretischen Betrachtungen ist eine gleichförmige Schallabstrahlung (ohne Richtcharakteristik) in einem homogenen verlustfreien Luftraum. In diesem baut sich um eine Punktschallquelle ein Kugelwellenfeld auf. Da die Schallwellen bei ihrer Ausbreitung auseinanderlaufen, verteilt sich die abgestrahlte Schallleistung der Quelle auf immer größere Kugelflächen. Die Gesamtenergie bleibt dabei konstant, so dass die Intensität, und damit der Schallwechseldruck, mit zunehmendem Abstand von der Schallquelle abnimmt. Dieses Phänomen der Pegeldämpfung wird in der Abb. E.5 in einer grafischen Vereinfachung verdeutlicht.

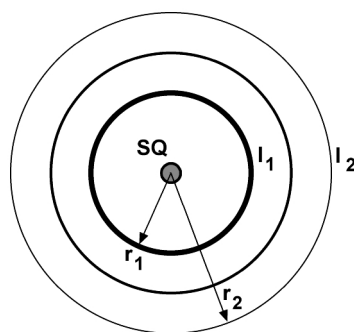


Abb. E.5: Schallpegelabnahme durch Divergenz, in Anlehnung an [Ste 97, S.69]

Für eine Punktschallquelle lassen sich die Intensitäten I_1 und I_2 von zwei Messpunkten mit Ihren Abständen r_1 und r_2 von der Schallquelle ins Verhältnis setzten, so dass sich die Schallpegeländerung zwischen beiden Punkten lediglich aus dem Verhältnis der Abstände berechnen lässt [Ste 97, S.69]:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{r_1^2}{r_2^2} \quad \Rightarrow \quad \Delta L = L_2 - L_1 = 10 \cdot \lg(I_2/I_1) = 20 \cdot \lg(r_1/r_2) \text{ [dB]}$$

Unter Freifeldbedingungen sinkt demnach bei einer Abstandsverdopplung der Schallpegel um 6 dB ab. Solche Bedingungen sind aber nur theoretisch oder in speziell konstruierten schalltoten Räumen möglich. In der Realität erfolgt eine Schallabstrahlung zumeist in den Halbraum, so dass Reflexionen von der Bodenfläche nicht zu verhindern sind. Auch bei einem sehr weichen, schallabsorbierenden Untergrund stellen die 6 dB eine obere Grenze der Ausbreitungsdämpfung dar. In der Praxis rechnet man deshalb bei einer Abstandsverdopplung häufig mit einer Pegelabnahme von 5 dB [Ste 97, S.70]; [Hen 99, S.188].

E.2.2 Dissipationsverluste an der Luftschicht

Während seiner Ausbreitung erfährt der Schall eine Dämpfung durch das Übertragungsmedium. In der Luft ist das eine Folge von innerer Reibung, Wärmeleitung sowie innermolekularer Verluste. Letztere sind am wesentlichsten für die Dämpfung verantwortlich und beruhen auf einer Hysteresis-Wirkung am Sauerstoffmolekül [Hen 99, S.204]. Sie sind von der Umgebungstemperatur, der Luftfeuchtigkeit und im starken Maße von der betrachteten Frequenz abhängig. Der atmosphärische Luftdruck hat nur eine vernachlässigbar kleine Auswirkung [ISO 9613-2].

Die Änderung des Schallpegels infolge der Luftabsorption wird mit dem Dämpfungsmaß D_L berücksichtigt. Die Formel beruht auf dem Ansatz, dass die von der Luft absorbierte Intensität ΔI proportional mit der Schichtdicke verbunden ist [Hen 99, S.204], da diese Dissipationsverluste linear mit der Entfernung von der Schallquelle zunehmen:

$$D_L = \alpha_L \cdot s \text{ [dB]}$$

Die Schichtdicke bzw. der Ausbreitungsweg ist durch die Strecke s [m] gekennzeichnet und die Pegelabnahme beschreibt der Luftabsorptionskoeffizient α_L [dB/km]. Eine explizite Berechnungsvorschrift für α_L gibt es nicht. Die sehr detailliert aufgeschlüsselten Werte der ISO 9613-1

beruhen alle auf Messungen, an denen sehr deutlich zu erkennen ist, dass die Dämpfung mit steigender Frequenz zunimmt. Eine abnehmende Temperatur oder Feuchtigkeit weist aber nicht pauschal auf eine Dämpfungserhöhung hin. Die Abhängigkeiten sind wesentlich komplexer.

Soll die Akustik eines Raumes mit Hilfe der statistischen Raumakustik oder durch eine Simulation abgeschätzt werden, ist die Angabe der Dissipationsverluste in Form einer Pegeldämpfung ungünstig. In Simulationsprogrammen, die Schallteilchen entlang von Strahlen verfolgen, wird eine Angabe der Absorptionsverluste entlang der zurückgelegten Wegstrecke des Teilchens benötigt. Ein solcher Schalldämpfungskoeffizient m der Luft lässt sich mit dem Luftabsorptionskoeffizienten α_L berechnen:

$$m = \frac{\alpha_L}{10 \cdot \log e} \text{ [1/km]} \approx \frac{\alpha_L}{4343} \text{ [1/m]}$$

Für statistische Betrachtungen der Akustik wird die aus der Pegeldämpfung resultierende Größe der äquivalenten Schallabsorptionsfläche der Luft benötigt [Fas 98, S.102]. Diese lässt sich aus dem Schalldämpfungskoeffizienten und dem Raumvolumen nach DIN EN 12354-6 folgendermaßen bestimmen:

$$A_L = 4 \cdot m \cdot V \text{ [m}^2\text{]}$$

E.3 Schallausbreitung in geschlossenen Räumen

E.3.1 Diffuses Schallfeld

Im Gegensatz zum freien Schallfeld ist bei der Schallausbreitung in geschlossenen Räumen nicht nur der Direktschall der Schallquelle selbst maßgebend. Infolge von Reflexionserscheinungen an den Raumbegrenzungsflächen, Einbauten und Gegenständen wird der Direktschall verstärkt und es bildet sich in einem bestimmten Abstand zur Schallquelle ein – zumindest theoretisch – nahezu vollkommen diffuses Schallfeld mit konstanter Energiedichte und Intensität aus. Dieses diffuse Schallfeld muss sich nach dem Einschalten einer Schallquelle erst aufbauen, bis sich nach einer gewissen Zeit (Anhall) ein Gleichgewichtszustand zwischen der abgestrahlten Schallleistung und der an den Raumflächen absorbierten Energie einstellt. Das diffuse Schallfeld ist unabhängig von der Entfernung zur Schallquelle an allen Punkten des Raumes (außerhalb des Nahfeldes) nahezu konstant. Wird die Schallquelle abgeschaltet, verbleibt die Schallenergie infolge der Reflexionserscheinungen innerhalb des Raumes und wird durch die Absorptionsverluste stetig abgebaut. Dieses Phänomen wird als Halligkeit oder Nachhallen des Raumes empfunden. Die zeitliche Struktur eines diffusen Schallfeldes ist in der Abb. E.6 schematisch dargestellt.

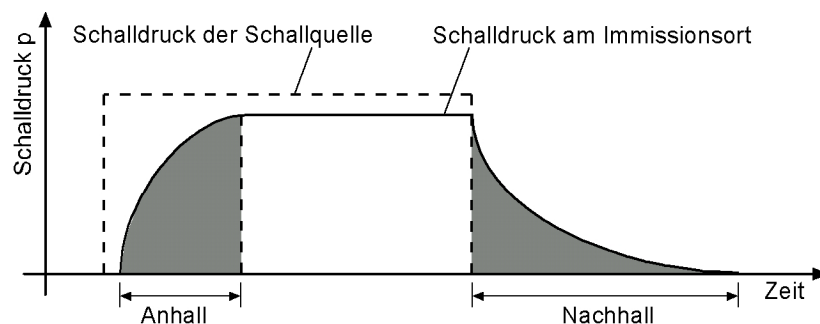


Abb. E.6: Zeitlicher Auf- und Abbau des Schalldruckes im diffusen Schallfeld, [Arn 04, S.38]

E.3.2 Nahfeld und Hallradius

Bei räumlicher Betrachtung überwiegt in direkter Nähe einer Schallquelle, im Freifeld wie in geschlossenen Räumen, der Einfluss des Direktschalls. In dem sogenannten Nahfeld weist das Schallfeld differenzierte physikalische Eigenschaften auf, die durch Messgeräte nicht interpretiert werden können. Aus diesem Grund darf bei Messungen sowie Simulationen keine Hörerposition in diesem Bereich angeordnet werden. Das Nahfeldes ist durch einen Abstand r_N vom Schallquellmittelpunkt definiert, der sich aus dem Maximum der 1,5fachen Wellenlänge des betrachteten Frequenzbereiches und dem 1,5fachen der größten Ausdehnung der Schallquelle ergibt [Arn 04, S.31ff]. In der Abb. E.7 wird der Verlauf des Schalldruckpegels um eine Schallquelle in einem geschlossenen Raum in qualitativer Form dargestellt.

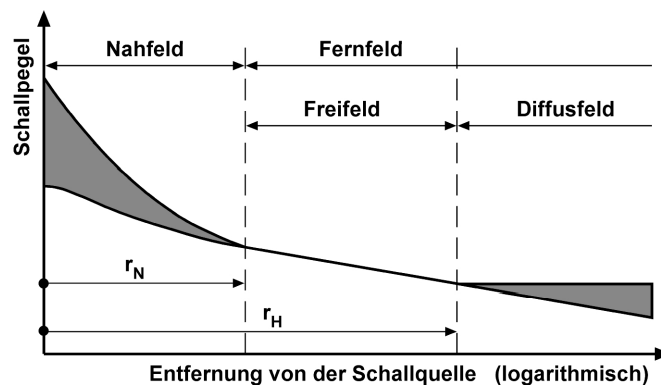


Abb. E.7: Schalldruckpegelverteilung in Abhängigkeit von der Entfernung zur Schallquelle, [Arn 04, S.31]

An das Nahfeld schließt in geschlossenen Räumen ein Bereich an, in dem der Schalldruckpegel wie unter Freifeldbedingungen linear mit Abstandsverdopplung abnimmt. Mit zunehmender Entfernung von der Schallquelle nimmt der Einfluss der Reflexionen an den Raumbegrenzungsflächen zu, bis in einem bestimmten Abstand von der Schallquelle der Direktschall und das diffuse Schallfeld die gleiche Energie besitzen. Dieser Abstand wird mit Hallabstand, beziehungsweise für Schallquellen, die den Schall ungerichtet nach allen Seiten in gleicher Stärke abstrahlen, mit Hallradius r_H bezeichnet. Durch gleichsetzen der Energieanteile des Direktschalls und des diffusen Schallfeldes lässt sich der Hallradius berechnen [Hen 99, S.283]:

$$r_H = \sqrt{\frac{A_{\text{ges}}}{16 \cdot \pi}} \approx 0,141 \cdot \sqrt{A_{\text{ges}}} \quad [\text{m}]$$

An der Formel ist deutlich zu erkennen, dass der Hallradius nur von der Absorptionsfläche des Raumes abhängt und damit vollkommen unabhängig von der Leistung der Schallquelle ist, lediglich deren Richtcharakteristik geht in die Berechnung des Hallabstandes ein. Damit ist der Hallradius eine spezifische Raumeigenschaft, die proportional mit der Absorption und damit frequenzabhängig zunimmt. Bei akustischen Messungen und Simulationen in geschlossenen Räumen beziehen sich die Bewertungskriterien immer auf Größen des statischen Schallfeldes. Der Hallradius dient dementsprechend als der Mindestabstand der Hörerpositionen von der Schallquelle, um einen zu starken Direktschalleinfluss zu vermeiden.

E.3.3 Äquivalente Schallabsorptionsfläche

Für die Energieverluste bei einer Reflexion ist bei statistischen Betrachtungen des Schallfeldes neben dem Absorptionsgrad α die geometrische Fläche S des Bauteils maßgeblich. Das Produkt aus beiden Größen kennzeichnet eine Ersatzfläche, die vollständig absorbierend wirkt. Da in ihr das gesamte Absorptionsvermögen des Bauteils konzentriert ist, wird sie äquivalente Schallabsorptionsfläche A genannt [Fas 98, S. 68]:

$$A_i = \alpha_i \cdot S_i \quad [\text{m}^2]$$

Für fein strukturierte Einbauten und Gegenstände lässt sich oft das Absorptionsvermögen schwierig über ihre Oberflächen berechnen, besonders wenn diese geometrisch schwer zu erfassen sind. In solchen Fällen wird oft eine zugehörige Absorptionsfläche A_j direkt angegeben. Im Raum befindliche Personen oder leeres Gestühl besitzen ebenfalls eine nicht zu vernachlässigende Absorptionswirkung. Diese unterliegt allerdings einer großen Streubreite [Fas 98, S.98]. Einflussfaktoren sind vor allem die Kleidung (Sommer- oder Winterbekleidung), der Besetzungszustand des Raumes (voll-, teil- oder unbesetzt) sowie die Besetzungsdichte (einzelne Person, weit entfernt oder eng benachbart sitzend). Für Publikum und Gestühl wird die ermittelte äquivalente Absorptionsfläche auch häufig in einen auf die Besetzungsfläche bezogenen Absorptionsgrad umgerechnet. Auch für die Dämpfung des Schalls durch das Übertragungsmedium kann bei statistischen Betrachtungen der Raumakustik eine äquivalente Schallabsorptionsfläche A_L angegeben werden (siehe E.2.2 “Dissipationsverluste an der Luftschicht”).

Durch Aufsummieren aller Teilabsorptionsflächen, wird die Gesamtabsorption eines geschlossenen Raumes in einer Fläche zusammengefasst. Sie stellt die einzige vollständig absorbierende Teilfläche A_{ges} eines akustisch gleichwertigen Modellraumes gleichen Volumens aus ansonsten rein reflektierenden Oberflächen dar [Fas 98, S. 68]:

$$A_{\text{ges}} = \sum \alpha_i \cdot S_i + \sum A_j + A_L \quad [\text{m}^2]$$

E.4 Messsystem “WinMLS 2000“

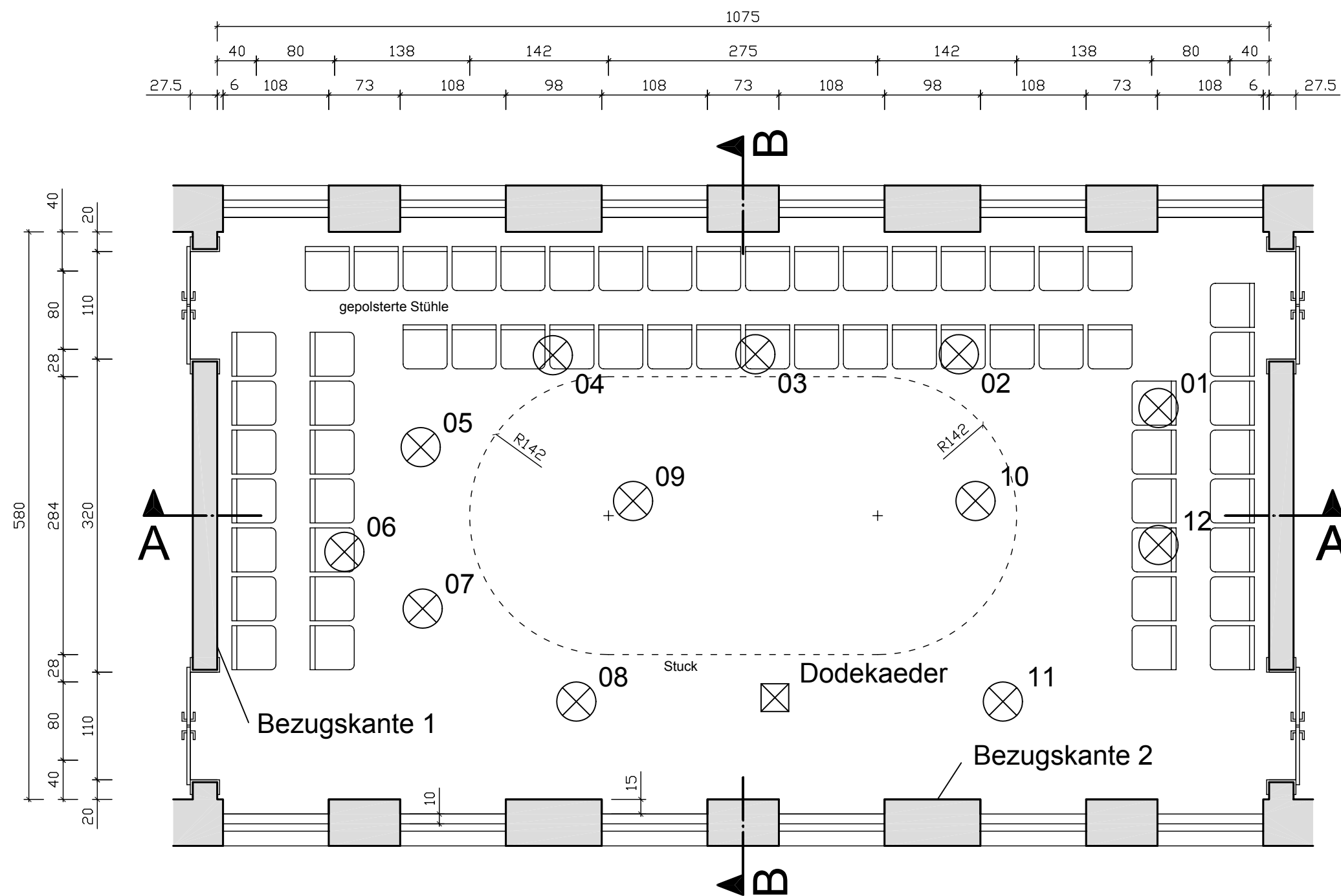
Anhand der Raumimpulsantwort können die Energieanteile des Direktschalls, der Anfangsreflexionen und der den Nachhall charakterisierenden späten Reflexionen an einem betrachteten Messpunkt besonders gut dargestellt, sowie die zeitliche Folge eintreffender Reflexionen und deren Energiegehalt abgelesen werden. Damit ist durch die Raumimpulsantwort das Schallfeld an einem Messpunkt eindeutig beschrieben. Aus diesem Grund wurde für die Ermittlung der raumakustischen Parameter des Referenzobjektes die Impulsantwort des Raumes messtechnisch ermittelt (impulse response measurement).

Für die Messung der Raumimpulsantwort kann ein Schallimpuls verwendet werden. Dieser sollte möglichst kurz und energiereich sein (Dirac-Stoß – ideeller, unendlich kurzer Impuls), da sich das Spektrum eines Impulses mit Verkürzung der Einwirkzeit verbreitert [Hen 99, S.67]. Ein Impuls kann auf vielfältige Weise erzeugt werden. Bei Messungen zur Raumakustik sind elektronisch erzeugte Rauschimpulse, Spannungsüberschläge an Funkenstrecken sowie Pistolenschüsse zulässig. Allerdings ist bei diesen Messmethoden die Eliminierung des Störpegels oftmals kompliziert [Fas 98, S.154].

Wesentlich unproblematischer ist dagegen die Anregung des Raumes mit einem speziellen nichtimpulsiven Geräusch. Für die raumakustischen Untersuchungen des Sommersaales wurde das rechnergestützte Messsystem “WinMLS 2000“ der Firma “Morset Sound Development“ verwendet. Mit diesem Programm lässt sich ein pseudo-statistisches Rauschen mit sog. Maximalfolgesequenzen (MLS ... maximum length sequence) erzeugen, dass wie ein Rauschsignal abgestrahlt werden kann. Aus dem aufgenommenen Verlauf des Schallwechseldrucks ermittelt die “WinMLS“-Software über eine computergesteuerte Kreuzkorrelation mit dem originalen MLS-Signal die Raumimpulsantwort an der jeweiligen Messposition. Während des Messvorgangs wurden an jeder Messposition vier MLS-Sequenzen abgestrahlt. Eine Sequenz dient zum Anregen des Raumes (siehe E.3.1 “Diffuses Schallfeld“), während aus den anderen drei Sequenzen ein Mittelwert der Raumimpulsantwort berechnet wurde.

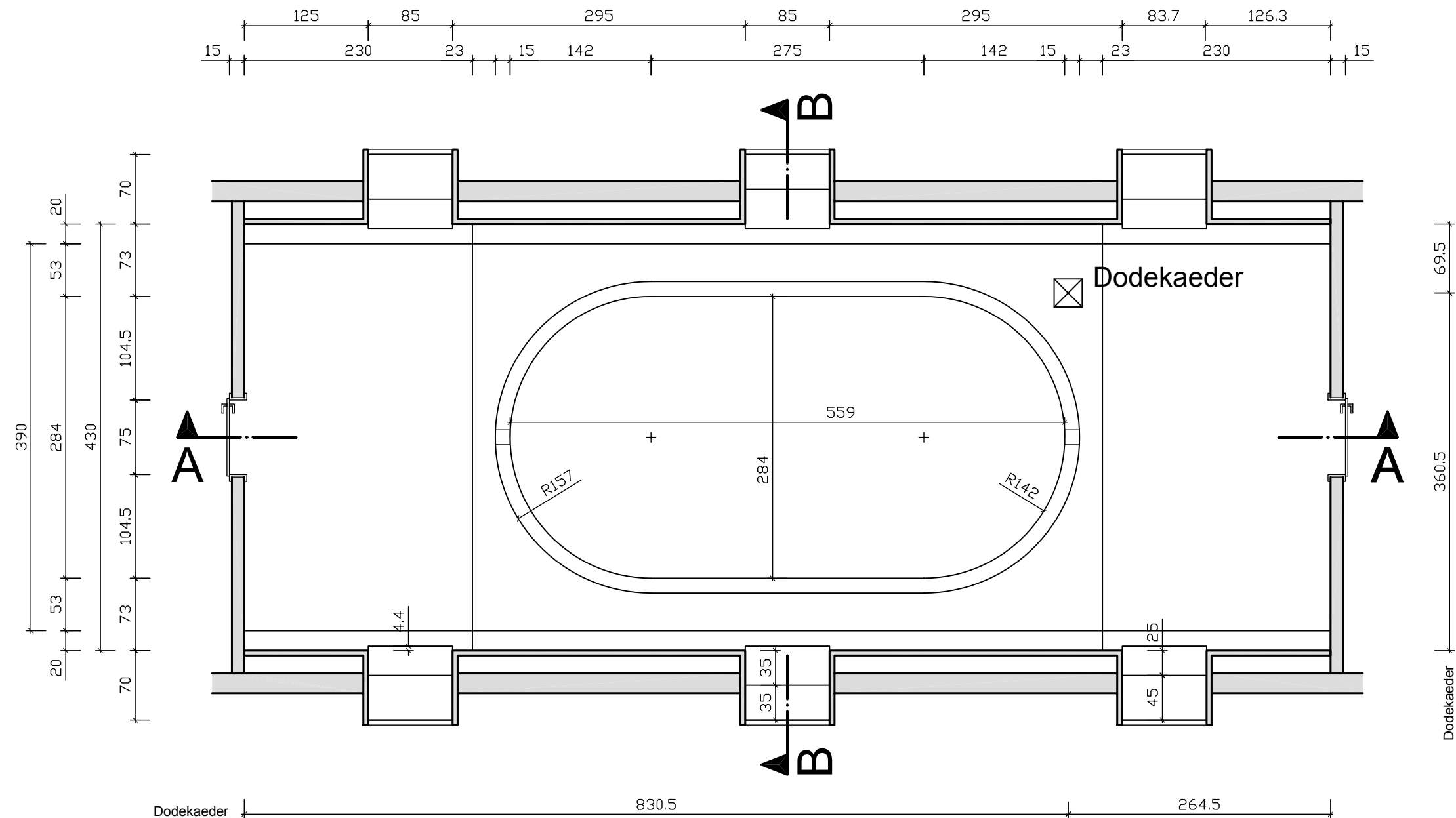
Mit der ermittelten Impulsantwort wurden alle relevanten Schallfeldparameter analysiert. Neben den Energiekriterien berechnet die “WinMLS“-Software über eine Rückwärtsintegration der quadrierten Raumimpulsantwort nach DIN EN ISO 3382 in den betreffenden Oktav- oder Terzbändern die Abklingkurve des Schalldruckpegels. Auf diese Weise konnte die Nachhallzeit sowie die Anfangsnachhallzeit mit größerer Genauigkeit und wesentlich unabhängiger vom Störpegel berechnet werden [Fas 98, S.154].

E.5 Referenzobjekt Sommersaal im Bosehaus

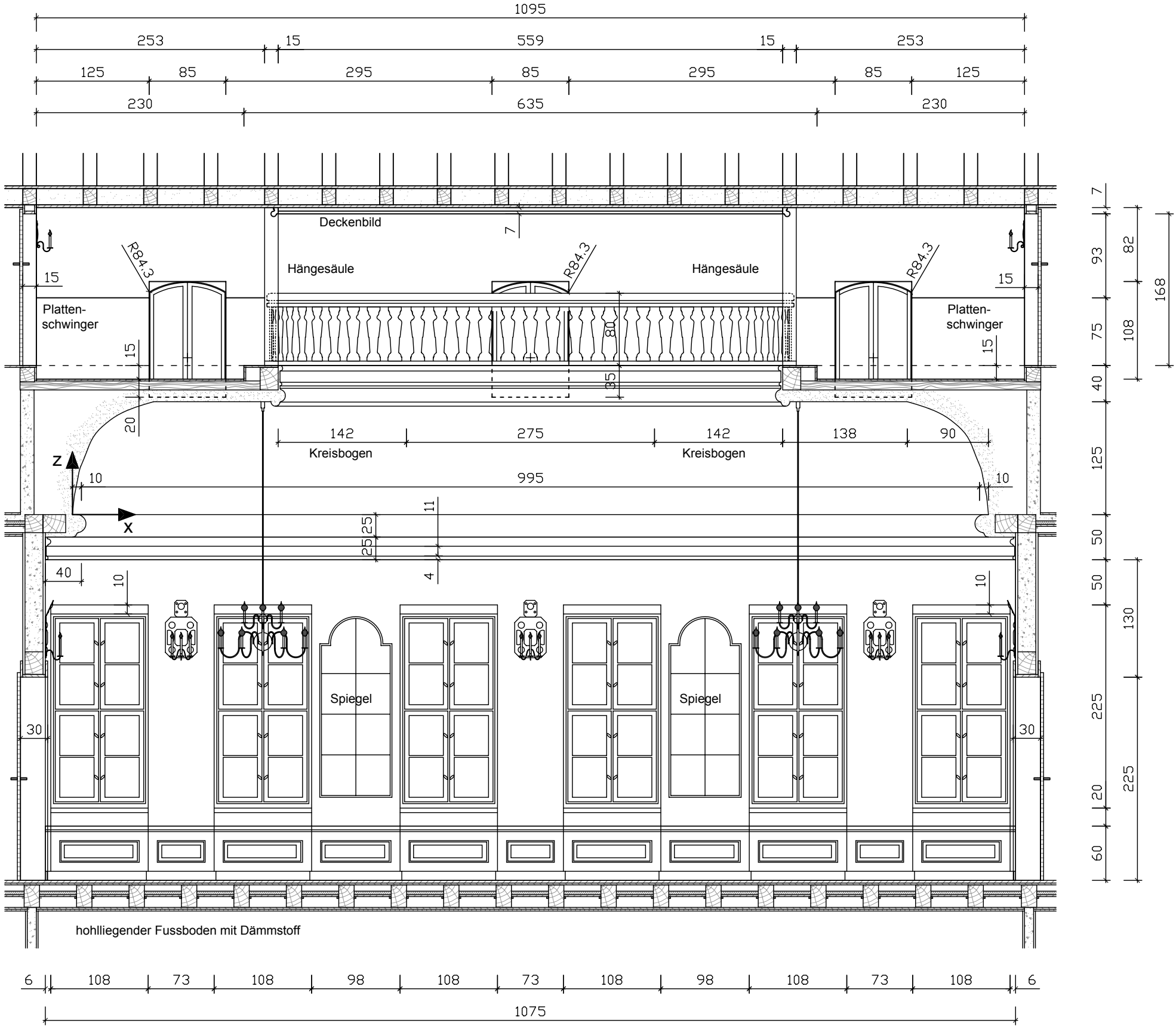


Messpunkte	Bezugskante 1	Bezugskante 2
Dodekaeder	5,70	1,04
01	9,62	4,00
02	7,58	4,55
03	5,50	4,55
04	3,43	4,54
05	2,08	3,60
06	1,30	2,53
07	2,10	1,95
08	3,67	1,00
09	4,25	3,05
10	7,75	3,05
11	8,03	1,00
12	9,62	2,60

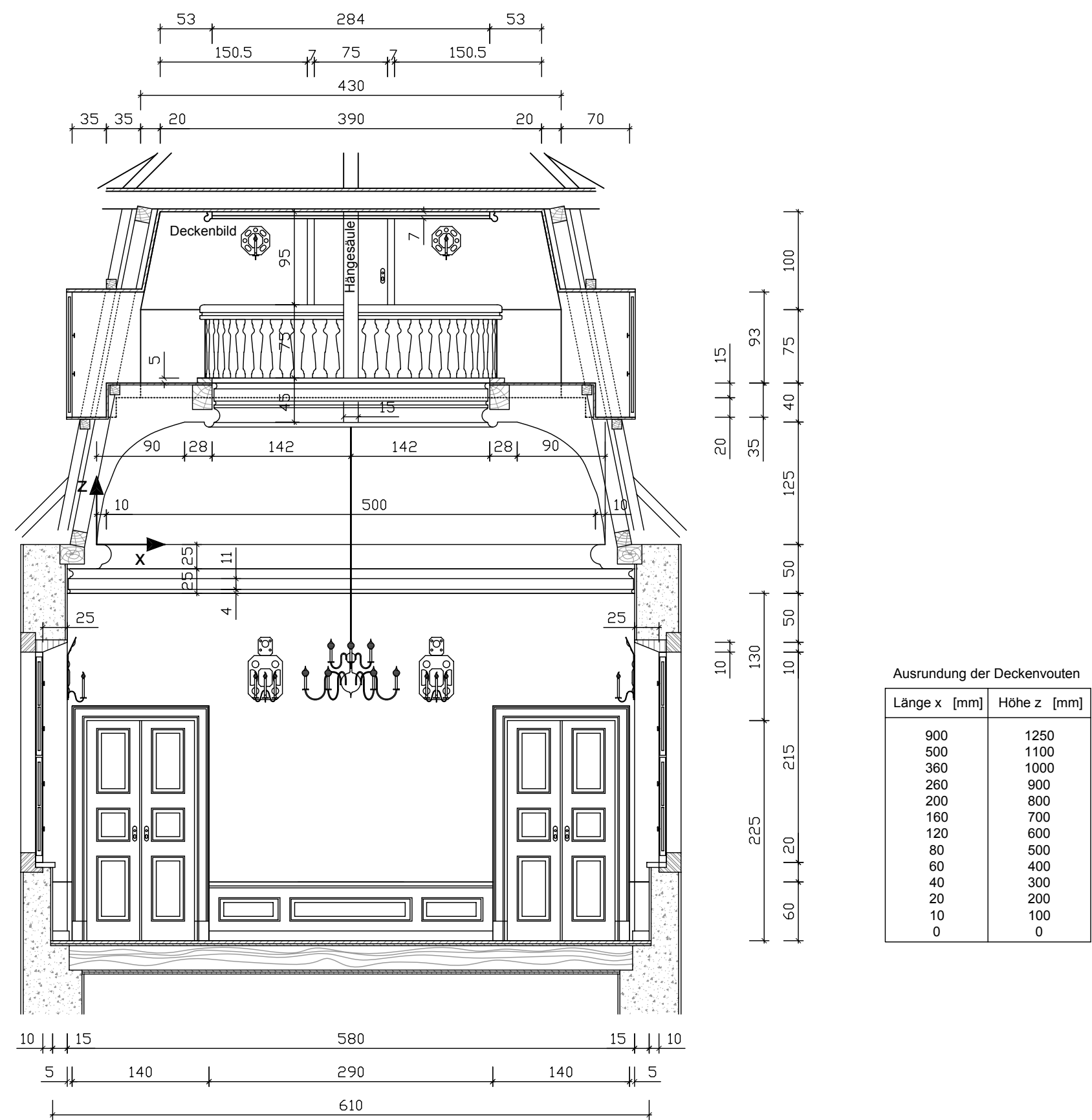
Diplomarbeit - Raumakustische Rekonstruktion der Schlosskapelle im Weimarer Residenzschloss im Zustand von 1658-1774



Diplomarbeit - Raumakustische Rekonstruktion der Schlosskapelle im Weimarer Residenzschloss im Zustand von 1658-1774

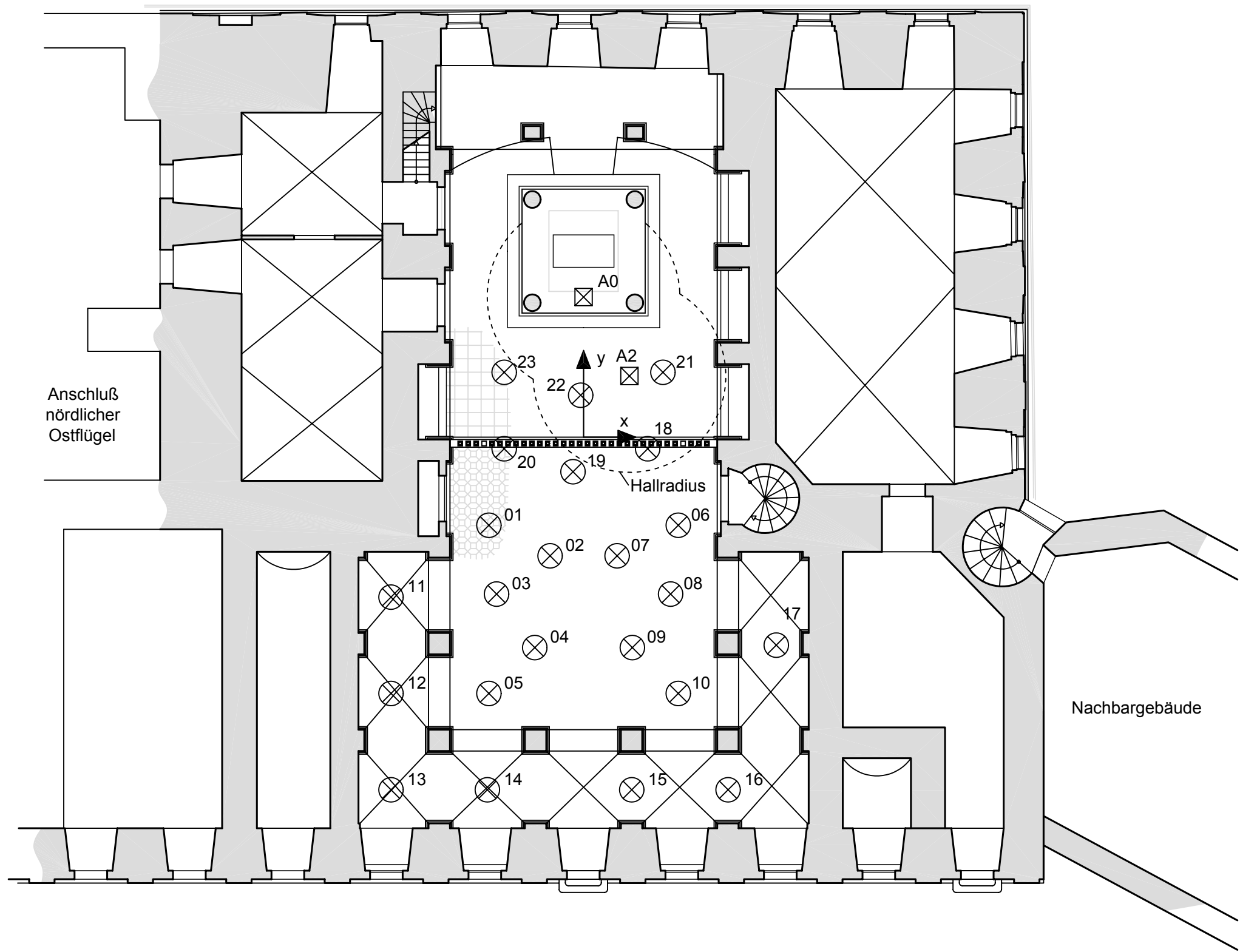


Diplomarbeit - Raumakustische Rekonstruktion der Schlosskapelle im Weimarer Residenzschloss im Zustand von 1658-1774



Diplomarbeit - Raumakustische Rekonstruktion der Schlosskapelle im Weimarer Residenzschloss im Zustand von 1658-1774

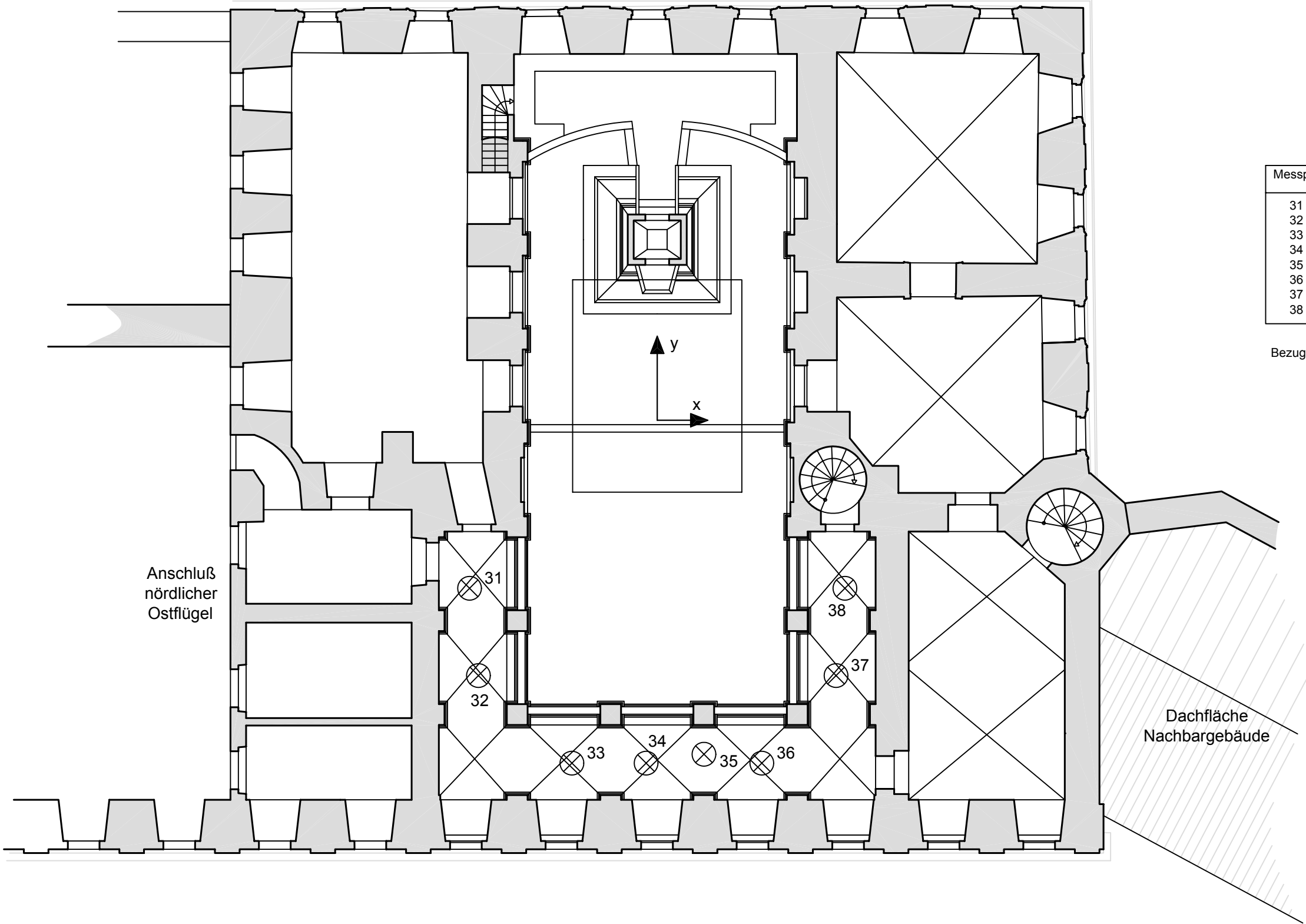
E.6 “Himmelsburg“



Messpunkt	Ursprung x y		Höhe
Quelle A0	0.000	4.580	5.350
Quelle A2	1.500	2.000	1.350
Kirchenbänke, nördlicher Block			
01	-3.095	-2.880	1.200
02	-1.095	-3.880	1.200
03	-2.845	-5.130	1.200
04	-1.595	-6.880	1.200
05	-3.095	-8.380	1.200
Kirchenbänke, südlicher Block			
06	3.095	-2.880	1.200
07	1.095	-3.880	1.200
08	2.845	-5.130	1.200
09	1.595	-6.880	1.200
10	3.095	-8.380	1.200
Stehplätze, unter den Emporen			
11	-6.295	-5.230	1.500
12	-6.295	-8.380	1.500
13	-6.295	-11.530	1.500
14	-3.145	-11.530	1.500
15	1.575	-11.530	1.500
16	4.725	-11.530	1.500
17	6.300	-6.800	1.500
Stehplätze, vor den Kirchenbänken			
18	2.095	-0.380	1.500
19	-0.345	-1.130	1.500
20	-2.595	-0.380	1.500
Stehplätze, im Chorbereich			
21	2.595	2.120	1.350
22	-0.095	1.370	1.350
23	-2.595	2.120	1.350

Bezugshöhe: Fussbodenniveau im Langhaus

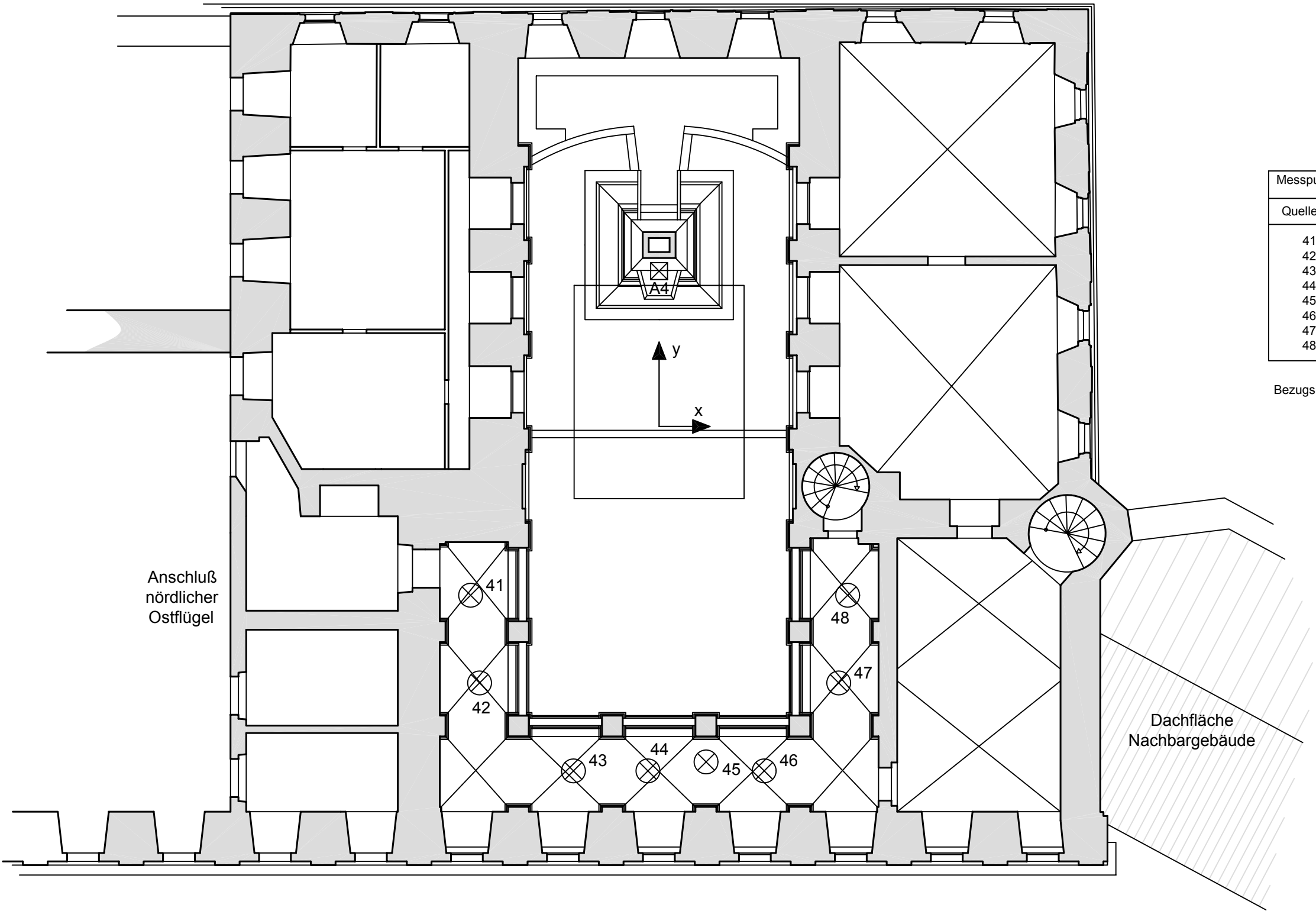
Diplomarbeit - Raumakustische Rekonstruktion der Schlosskapelle im Weimarer Residenzschloss im Zustand von 1658-1774



Messpunkt	Ursprung x y		Höhe
31	-6.325	-5.660	7.080
32	-6.025	-8.600	7.080
33	-2.875	-11.250	7.080
34	-0.375	-11.550	7.080
35	1.575	-11.250	7.080
36	3.525	-11.550	7.080
37	6.025	-8.600	7.080
38	6.325	-5.660	7.080

Bezugshöhe: Fussbodenniveau im Langhaus

Diplomarbeit - Raumakustische Rekonstruktion der Schlosskapelle im Weimarer Residenzschloss im Zustand von 1658-1774



Messpunkt	Ursprung x y		Höhe
Quelle A4	0.000	5.210	18.210
41	-6.325	-5.660	13.440
42	-6.025	-8.600	13.440
43	-2.875	-11.250	13.440
44	-0.375	-11.550	13.440
45	1.575	-11.250	13.440
46	3.525	-11.550	13.440
47	6.025	-8.600	13.440
48	6.325	-5.660	13.440

Bezugshöhe: Fussbodenniveau im Langhaus

Ausrundung der Dachkuppel

Länge x,y [mm]	Höhe z [mm]
4810	3050
3935	2982,5
3565	2912,5
3060	2775
2360	2500
1500	2000
910	1500
460	1000
150	500
0	0

Bezugspunkt: oberer Eckpunkt der Wandflächen in der "Capella"

E.7 Daten – CD

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich genannten Quellen und Hilfsmittel verwendet. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht.

Weimar, März 2005



Unterschrift
